Materiale izolatoare

1. Noţiuni introductive despre izolatori

Izolatorii sau dielectricii sunt materiale în care electronii de valenţă (posibili purtători de sarcină) sunt localizaţi în cadrul legăturilor ce ţin atomii împreună. Izolatorii au electronii învelișului exterior blocați fie în legături covalente puternice, fie sunt restricționați la regiuni apropiate de un nucleu atomic (ca în cazul unui compus ionic), fie de legături mixte ionice+covalente, sau chiar şi de legăturile van der Waals dintre atomii cu pături electronice complete, și deci nu se pot deplasa prin structură pentru a facilita conducția electrică.

Cele mai comune materiale electroceramice, cum ar fi cazul multor oxizi (adică MgO) sau majoritatea polimerilor (adică polietilena), sunt izolatori electrici (dielectrici). Totuşi, este posibil să fie dopați cu cationi corespunzători pentru a deveni semiconductori sau chiar conductori.

Materialele izolatoare electric sunt adesea denumite dielectrici, cu singura mențiune că termenul „izolator” este în general folosit pentru a indica obstrucția electrică, în timp ce termenul „dielectric” este folosit pentru a indica capacitatea materialului de a stoca energie, adică de a deveni polarizat în condițiile aplicătii unui câmp electric.

2. Dielectricii şi dipolul electric

În ultimul secol și jumătate, mulți oameni de știință și ingineri au fost fascinați de proprietățile electrice ale dielectricilor și și-au concentrat cercetările pentru dezvoltarea de noi compoziții chimice și materiale care sunt utilizate în mod util într-o varietate de aplicații. Aceste materiale dielectrice noi au fost amplu studiat și caracterizat, iar interesul a devenit și mai intens în ultimele decenii când s-au atins progrese semnificative.

Un dielectric poate fi descris ca un izolator electric care poate fi polarizat de un câmp electric aplicat, fără transport de sarcină pe distanță lungă, ci doar cu o rearanjare limitată, astfel încât materialul să dobândească un moment dipol electric (Figura 1).

Când se aplică un câmp electric extern, $\mathbf{E_0}$, sarcinile negative și sarcinile pozitive vor fi forțe de experiență care acționează în direcții opuse. Nucleele pozitive sunt deplasate spre câmpul electric impus, iar electronii negativi se deplasează în sens opus (Figura 1.b). Amploarea deplasării relative este direct proporțională cu energia de legare a electronilor, cu masa nucleelor atomice și cu intensitatea câmpului electric aplicat. Această deplasare are ca rezultat formarea de dipoli electrici interni – Figura 1.b. Dipolii electrici sunt formați din două sarcini punctiforme egale și opuse, care sunt separate printr-o distanță **r** – Figura 1.c.

Momentul dipol electric, **p**, este un vector care merge de la sarcina negativă la sarcina pozitivă și este definit prin:

$$\boldsymbol{p} = q \times \boldsymbol{r} \tag{1}$$

unde q este sarcina dipolului electric.

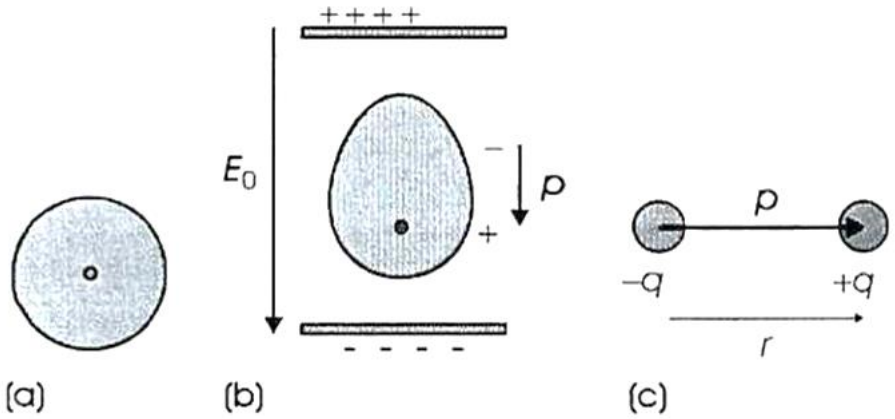

Figura 1. Centrul de greutate al sarcinilor pozitive și negative din interiorul unui atom, în absența unui câmp electric (a) și în prezența unui câmp electric creând un dipol (b). Dipolul electric este format din două sarcini egale și opuse separate prin distanță, **r** (c).

Momentele dipolului electric se adună, rezultând încărcarea pozitivă, respectiv negativă a suprafețelor opuse ale materialului – Figura 2. Materialul devine polarizat, iar mărimea fizică care descrie acest fenomen se numește polarizare. Polarizarea dielectrică, **P**, a dielectricului este un vector definit ca momentul dipolului electric pe unitate de volum și poate varia de la o regiune la alta. Vectorul de polarizare are aceeași direcție și orientare cu câmpul electric aplicat, $\mathbf{E_0}$, de la suprafața încărcată pozitiv la cea negativă (Figura 2).

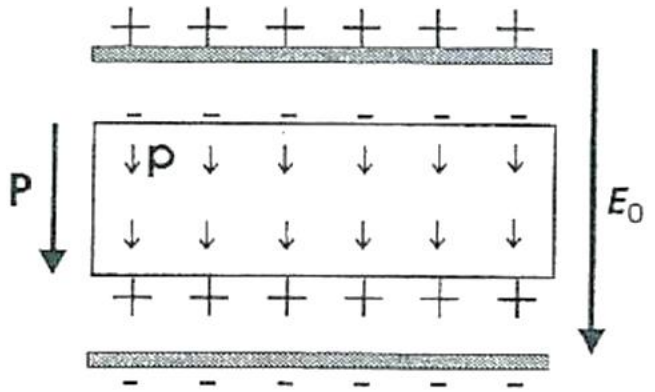

Figura 2. Încărcarea suprafeței sub un câmp electric aplicat, $\mathbf{E_0}$, ca urmare a formării dipolilor interni.

Pentru un material solid care este uniform în toate direcțiile (are proprietăți liniare), polarizarea dielectrică **P** este proporțională cu intensitatea câmpului electric aplicat:

$$\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \boldsymbol{E_0} \quad (2)$$

unde χ este susceptibilitatea dielectrică a materialului și ε_0 este permisivitatea spațiului liber ($8{,}85418 \cdot 10^{-12}$ F·m^{-1}).

La valori normale pentru intensitatea câmpului electric, relația dintre susceptibilitatea dielectrică χ și permitivitatea relativă, ε_r, a materialului este: $\chi = (\varepsilon_r - 1)$

Deoarece susceptibilitatea dielectrică nu poate fi măsurată direct, permitivitatea relativă este preferată deoarece poate fi extrasă din măsurătorile capacității. Prin urmare, polarizarea dielectrică devine:

$$\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot \boldsymbol{E_0} \quad (3)$$

3. Câmpul Lorenz și permisivitatea dielectrică relativă

Deplasarea atomilor si a norului lor de electroni inconjurator, ca urmare a polarizarii dielectrice, atunci cand materialul dielectric este supus unui camp electric extern, $\mathbf{E_0}$, creeaza un camp opus care tinde sa-l anuleze partial pe cel impus.

Un atom sau ion individual nu este supus direct unui câmp electric extern aplicat ($\mathbf{E_0}$), ci unuia local ($\mathbf{E_L}$) care are o valoare foarte diferită. Acest câmp electric local, $\mathbf{E_L}$, include contribuții din câmpurile interne care decurg din dipoli induși și permanenți din structura.

Un câmp electric extern aplicat induce polarizarea uniformă a unui solid elipsoidal, iar pe de altă parte, polarizarea uniformă produce un câmp de depolarizare uniform în interiorul corpului materialului. Câmpul depolarizant, $\mathbf{E_{dp}}$, care rezultă din sarcinile de polarizare de pe suprafețele exterioare, poate fi calculat exact. Acest câmp de depolarizare poate fi redus la zero fie prin lucrul cu un eșantion lung, fie prin realizarea unei conexiuni electrice între electrozii suprafețelor opuse ale materialului.

S-a înțeles totuși că acest câmp macroscopic, $\mathbf{E_m}$, rezultat ca însumarea dintre $\mathbf{E_0}$ și $\mathbf{E_{dp}}$ ($\mathbf{E_m} = \mathbf{E_0} + \mathbf{E_{dp}}$) – Figura 3, este mai degrabă diferit decât câmpul local real $\mathbf{E_L}$, deoarece primul este adevărat numai dacă dielectricul solid ar fi considerat un continuum.

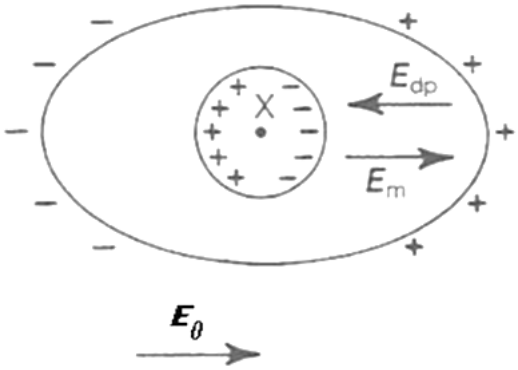

Figura 3. Câmpul electric într-un dielectric

Câmpul local, $\mathbf{E_L}$, cunoscut și sub numele de ***câmp Lorenz***, este dependent de natura atomică a materialului, prin urmare trebuie să includă contribuția dipolilor individuali adiacenți și a sarcinilor în pozițiile lor deplasate. Luând în considerare o regiune sferică în interiorul dielectricului, raza este aleasă astfel încât, văzută din punctul X, regiunea exterioară până la limita sferică este privită ca un continuum, în timp ce în interiorul limitei, natura atomică a dielectricului este discontinuă. Lorenz a calculat $\mathbf{E_L}$ ca suma câmpului electric extern și a câmpului de la dipolii din specimen. Câmpul de dipol poate fi descompus în câmpuri de dipol individuale, $\mathbf{E_L}$ obținându-se după cum urmează:

$$\boldsymbol{E_L = E_0 + E_{dp} + E_p + E_d} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{E_L = E_m + E_p + E_d} \quad (5)$$

unde $\mathbf{E_p}$ este contribuția sarcinilor de polarizare de la suprafața cavității sferice (câmpul cavității Lorenz) și $\mathbf{E_d}$ este câmpul produs de dipolii din interiorul limitei din interiorul cavității – Figura 4.

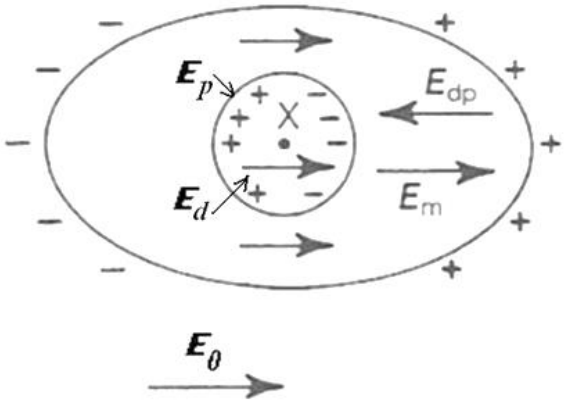

Figura 4. Câmpul electric local într-un dielectric, indicând și câmpurile electrice interne datorate sarcinilor de polarizare ale dipolilor, în interiorul și în exteriorul unei cavități sferice

Contribuția $\mathbf{E_{dp}}$+$\mathbf{E_p}$+$\mathbf{E_d}$ la câmpul local la un atom este cauzată de momentele dipolare ale tuturor celorlalți atomi din material.

S-a arătat că $\mathbf{E_p}$ este egal cu $\mathbf{P}/(3\varepsilon_0)$, în timp ce $\mathbf{E_d}$ trebuie calculat pentru fiecare material ales și pentru fiecare loc din material. Pentru anumite cristale de simetrie mare și sticle, $\mathbf{E_d} = 0$, dacă toți atomii pot fi înlocuiți cu dipoli punctiformi paraleli între ei.

Câmpul total care acționează asupra unui atom sau ion al unui izolator izotrop cum ar fi un gaz, sticlă sau un cristal cu simetrie cubică este uniform peste tot și este dat de **relația Lorenz**:

$$\boldsymbol{E_L = E_0 + E_{dp} + P/(3 \cdot \varepsilon_0)} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{E_L = E_m + E_{dp} + \gamma \cdot P} \quad (7)$$

unde γ este constanta câmpului intern.

Dacă se aplică un câmp electric între cele două plăci atunci când sunt separate doar prin vid (Figura 5a), acestea poartă o densitate de sarcină de suprafață ξ, descrisă de următoarea relație:

$$\mathbf{E} = \xi/\varepsilon_0 \quad (8)$$

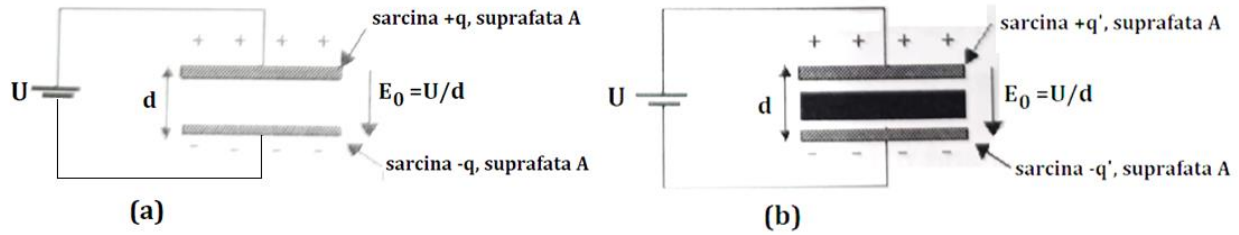

Figura 5. Acumularea sarcinilor pe plăcile metalice ale unui condensator atunci când se aplică un câmp electric, $\mathbf{E_0}$, cu tensiunea sa, U. În vid (a) și când un dielectric este plasat între plăci, favorizând creșterea sarcinii stocate cu un factor *k*, unde *k* este cunoscut și sub denumirea de permitivitate relativă (b)

Prin umplerea spațiului dintre două plăci paralele ale unui condensator cu un material dielectric (Figura 5b), este posibil să se dezvolte relații importante. La aplicarea unui câmp electric, densitatea de sarcină de polarizare care apare pe suprafețele dielectricului, ξ_p, compensează parțial densitatea totală de sarcină purtată de plăci, ξ_T, prin urmare densitatea efectivă care dă naștere lui E este redusă la (ξ_T- ξ_p) – ecuația 9.

$$\mathbf{E} = (\xi_T - \xi_p)/\varepsilon_0 \quad (9)$$

În general, densitatea de sarcină de polarizare care apare pe suprafețele dielectricului ξ_p este egală cu mărimea polarizării **P**, iar densitatea totală de sarcină ξ_T este echivalentă cu mărimea deplasării dielectrice, **D**. Rezultă că:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E_0} + \mathbf{P} \quad (10)$$

Din ecuațiile 2, 3 și 10 rezultă că:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E_0} \quad (11)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E_0} \quad (12)$$

întrucât $\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon$ (permitivitatea dielectrică a materialului).

În consecință, este posibilă stocarea sarcinii pe plăcile condensatoarelor, prin urmare aceste materiale dielectrice au devenit materiale de neprețuit în industria electronică.

Deoarece densitatea totală de sarcină ξ_T este egală cu q/A (unde q este sarcina totală stocată pe plăcile condensatorului și A este aria plăcii condensatorului), iar intensitatea intensității câmpului electric $\mathbf{E_0}$ este egală cu U/d (unde U este tensiunea aplicată și d este distanța dintre plăcile condensatorului), relația 11 devine:

$$\mathrm{q/A} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot U/d \quad (13)$$

sau

$$\mathrm{q/U} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A/d \quad (14)$$

Sarcina stocată q pe fiecare placă este o funcție a capacitanţei C și a tensiunii aplicate U:

$$\mathrm{q} = \mathrm{C} \cdot \mathrm{U} \quad (15)$$

Rezultă că capacitanţa poate fi obținută prin următoarele relații:

$$\mathrm{C} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A/d \quad (16)$$

$$\mathrm{C} = \varepsilon \cdot A/d \quad (17)$$

Cu toate acestea, capacitanţa vidului, C_0, (pentru vid) este egală cu:

$$\mathrm{C_0} = \varepsilon_0 \cdot \mathrm{A/d} \quad (18)$$

Prin aceasta, permitivitatea relativă, ε_r, a unui material dielectric poate fi determinată după cum urmează:

$$\varepsilon_r = \mathrm{C/C_0} \quad (19)$$

Permitivitatea electrică relativă, ε_r, este o mărime fizică care descrie capacitatea unui material, atunci când este supus unui câmp electric extern, de a polariza și de a reduce câmpul electric din interiorul său. Poate fi extras cu ușurință din măsurătorile capacitanţei. Pentru aer, $\varepsilon_r = 1$, pentru majoritatea dielectricilor solidi ionici, $\varepsilon_r = 5\text{-}10$, iar pentru dielectricii polari precum feroelectricii, $\varepsilon_r = 10^3$–10^4 (de exemplu, $BaTiO_3$).

4. Polarizarea electrică, mecanisme de polarizare și permitivitatea dielectrică complexă

Proprietățile medii ale unui material dielectric sunt descrise prin ecuațiile 2, 3, 11 și 12. Totuși, polarizarea macroscopică, **P**, a materialului în volum atunci când ultimul este plasat într-un câmp electric are o origine microscopică a polarizărilor individuale, care este suma tuturor momentelor dipolare individuale $\mathbf{p_j}$ ale materialului cu densitatea volumului dipolului N_j:

$$\mathbf{P} = \sum_j N_j \cdot \mathbf{p_j} \tag{20}$$

Pentru a găsi corelația dintre polarizarea macroscopică și proprietățile dielectrice microscopice ale materialului, se consideră o singură particulă polarizabilă.

Materialul dielectric devine polarizat, provocând polarizarea dielectrică care este rezultatul polarizabilității părților constitutive ale materialului. **Polarizabilitatea electrică** este tendința relativă a unei distribuții de sarcină de a fi distorsionată față de poziția sa normală prin aplicarea unui câmp electric extern aplicat, dar poate fi cauzată și de prezența unui ion din apropiere sau a unui alt dipol.

Momentul dipol electric indus într-o particulă constitutivă, $\mathbf{p_j}$, este proporțional cu polarizabilitatea acestei particule, α_j, și cu câmpul electric local, E_L, care acționează asupra acesteia – ecuația 21.

$$\mathbf{p} = \alpha_j \cdot \mathbf{E_L} \tag{21}$$

Pe lângă campul electric extern aplicat, $\mathbf{E_0}$, câmpul electric local total din cadrul unui material, $\mathbf{E_L}$, contribuie si alte campuri corespunzatoare diferitilor dipoli electrici; unii sunt dipoli permanenți, în timp ce alții sunt dipoli temporari induși de câmpul electric extern aplicat.

Întrucât în materia condensată interacțiunile dintre dipolii microscopici sunt destul de mari, câmpul electric local, $\mathbf{E_L}$, la poziția unui anumit dipol este dat de suprapunerea câmpului macroscopic aplicat, $\mathbf{E_0}$, și suma celorlalte câmpuri dipol. Prin urmare, pentru toate particulele constitutive, N_j, este posibil să scrieți polarizarea totală ca:

$$\mathbf{P} = \sum_j N_j \cdot \alpha_j \cdot \mathbf{E_L} \tag{22}$$

unde câmpul electric local, $\mathbf{E_L}$, poate fi diferit de la un loc la altul în material.

Polarizabilitatea totală a majorității unui material dielectric, $\alpha_{tot.}$, este compusă din mai multe contribuții separate de polarizare. În general, există 4 mecanisme principale de polarizare care contribuie la răspunsul dielectric total:

- polarizabilitatea atomică sau electronică α_e este deplasarea norului de electroni în raport cu nucleul dintr-un atom. Într-un câmp electric, sarcinile negative se polarizează, iar centrul lor nu mai coincide cu cel al sarcinilor nucleare pozitive, inducând astfel formarea unui dipol electric. Polarizabilitatea electronică, α_e, este proporțională cu volumul carcasei electronice, prin urmare, atomii mai mari au o polarizabilitate electronică mare, care este în general independentă de temperatură.

- polarizabilitatea ionică α_i este deplasarea ionilor pozitivi și negativi încărcați în interiorul unui cristal, într-un câmp electric.

- polarizabilitatea dipolară sau orientativă α_d, descrie alinierea dipolilor permanenți (de exemplu, în interiorul moleculelor, cum ar fi, de exemplu, în cazul apei, sau ionii deplasați în cazul solidelor ionice), atunci când se aplică un câmp electric. Orientarea preferată de-a lungul direcției câmpului electric aplicat este perturbată, totuși, de mișcarea termică. Deoarece în solide mișcarea moleculelor este practic restrânsă, această polarizare este mai des prezentă în lichide și solide.

- polarizabilitatea sarcinii spațiale α_s apare în materialele care prezintă neomogenități spațiale care conțin sarcini libere care pot deveni mobile sub influența unui câmp electric aplicat. Sarcinile spațiale pozitive se deplasează către un electrod, iar sarcinile spațiale negative către celălalt electrod, până când transportul purtătorilor de sarcină este limitat de o barieră de potențial, cum ar fi o limită de cereale sau o limită de fază. În regiunea electrozilor, acumularea de sarcini spaţiale polarizate inhibă mişcarea celorlalte sarcini deoarece s-a ajuns la o populaţie de echilibru.

$$\alpha_{tot.} = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d + \alpha_s \quad (23)$$

Aceste 4 mecanisme de polarizare sunt prezentate în Figura 6.

Pe lângă aceste contribuții, altele precum polarizarea peretelui domeniului (decisiva pentru feroelectrice – mișcarea peretelui domeniului care separă regiuni ale domeniilor orientate de polarizare diferită) sau polarizarea datorată defectelor care pot fi prezente în unele solide.

La plasarea dielectricului între plăci metalice într-o structură de condensator (Figura 5b), sarcinile electrice nu migrează pe toată lungimea materialului (ca în cazul conductorilor), ci sunt doar ușor deplasate față de pozițiile lor medii de echilibru. Cantitatea de sarcină stocată pe plăci este îmbunătățită cu un factor de k (constanta dielectrică), care este practic permisivitatea relativă a materialului dielectric ε_r ($\varepsilon_r = C/C_0$) și reprezintă măsura polarizabilității dielectrice a materialului.

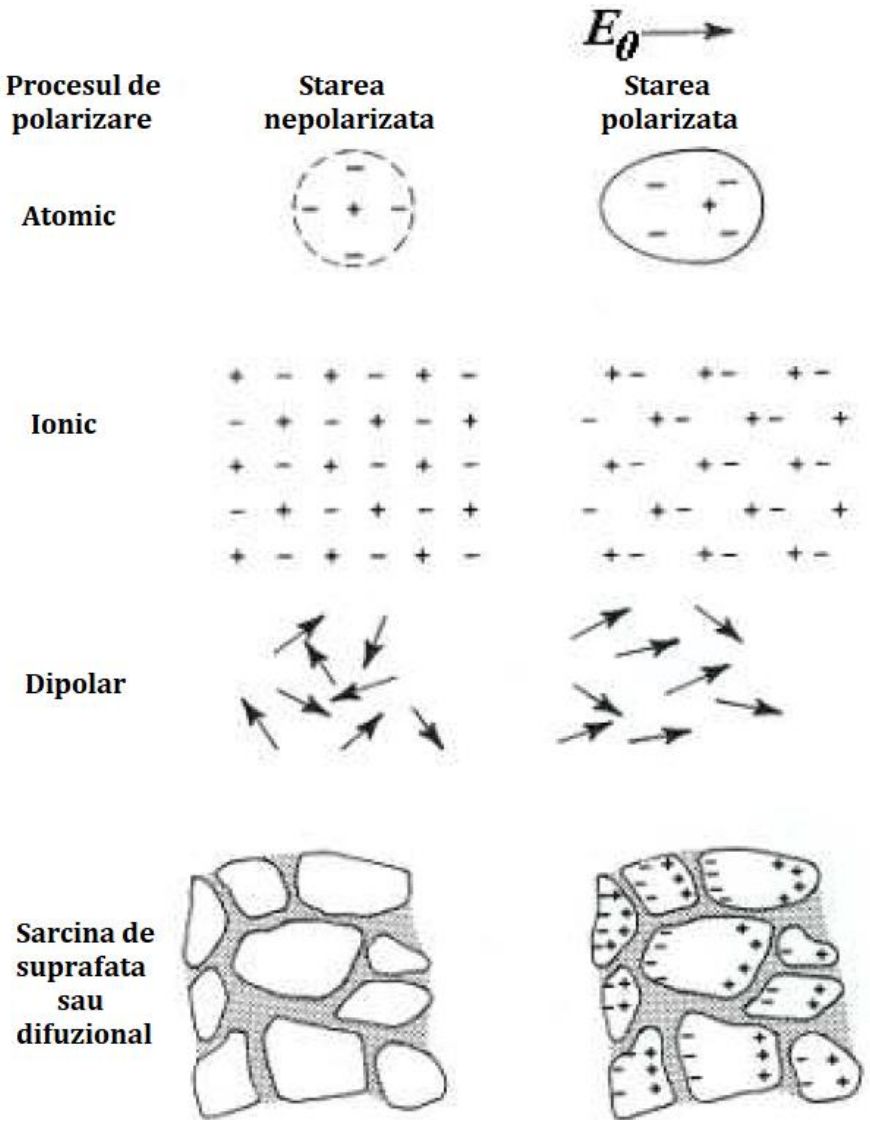

Figura 6. Diverse mecanisme de polarizare în materialele dielectrice

Pentru a raporta polarizabilitatea totală $\alpha_{tot.}$ la permitivitatea relativă ε_r, trebuie luate în considerare ecuațiile 3 și 22; se poate deriva deci relatia Clausius-Mossotti:

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r - 1} = \frac{N_j \cdot \alpha_j}{3\varepsilon_0} \tag{24}$$

Relația Clausius-Mossotti poate fi scrisă și în termeni de permitivitate macroscopică – ecuația 25:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 + 2 \cdot N_j \cdot \alpha_j}{\varepsilon_0 - N_j \cdot \alpha_j} \tag{25}$$

Această relație este valabilă numai pentru materiale omogene, izotrope, care nu conțin dipoli permanenți sau molecule dipolare, cum ar fi: sticle, solide amorfe și structuri cubice care prezintă doar polarizabilitate electronică și ionică.

Exact ca și în cazul polarizabilității unui material, permisivitatea relativă este compusă și din aceleași contribuții de dipol menționate mai sus. Contribuțiile corespunzătoare rețelei sunt intrinseci (ε_e, ε_i), în timp ce cele macroscopice generale sunt extrinseci (ε_d, ε_s). Aceste contribuții variate sunt la fel de importante într-un câmp electric static, în timp ce într-un câmp variabil (în special unul alternant) mișcarea pe rază scurtă a sarcinilor răspunde diferit la fiecare dintre regimurile de frecvență – Figura 7.

Conform teoriei și așa cum este prezentat în Figura 7, în domeniul de frecvență joasă, toate mecanismele de polarizare contribuie la permisivitatea relativă generală, iar valoarea acesteia este identică cu cea statică. Sarcinile spațiale nu pot fi polarizate în câmpuri electrice care apar mai repede de 10^6 Hz, contribuția lor nemaifiind prezentă la frecvențe mai mari decât această valoare. Urmând aceeași judecată, dipolii permanenți nu se mai pot roti atunci când frecvența alternantă a câmpului electric este în domeniul microundelor ($\approx 10^9$–10^{12} Hz). Mișcarea nucleelor atomice se oprește atunci când nu se mai produce polarizabilitatea ionică; acesta este cazul frecvențelor de obicei mai mari de 10^{12} Hz, corespunzătoare domeniului infraroșu. Contribuția polarizabilității electronice este încă prezentă în regiunile determinate de frecvențele ultraviolete vizibile și joase, dar scade în cele din urmă în gama superioară de frecvențe ultraviolete peste 10^{17} Hz.

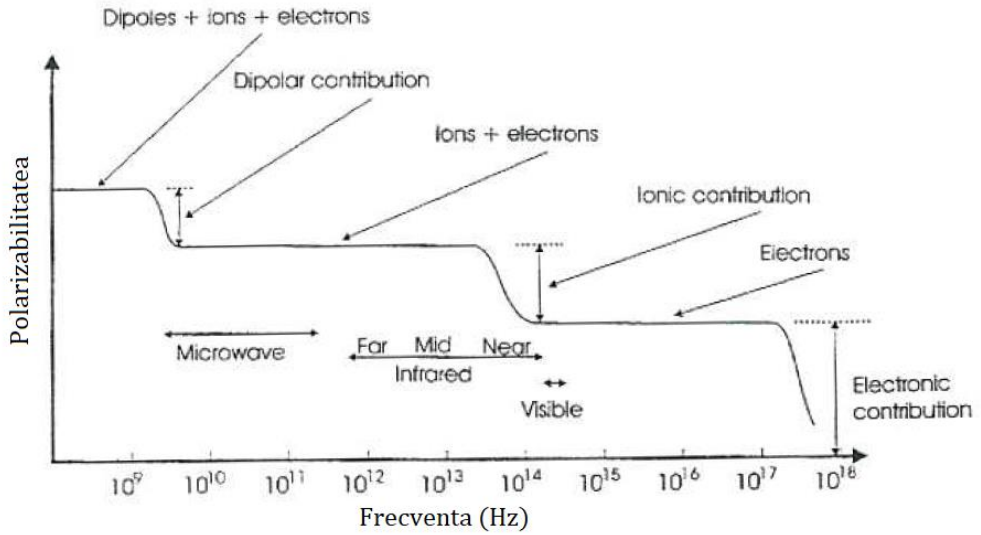

Figura 7. Contribuția polarizabilității electronice, ionice și dipolare la polarizabilitatea electrică totală a unui solid în raport cu diferite regimuri de frecvență

Pentru un condensator perfect, câmpul electric alternativ aplicat ar produce doar stocarea elastică a sarcinii, în timp ce pentru orice material dielectric real, există întotdeauna o pierdere sau disipare a sarcinii care are ca rezultat încălzirea dielectricului. Această parte inelastică a comportamentului electric poate fi privită ca un simplu rezistor într-un circuit; disiparea de energie a materialului, D sau tgδ, sub un câmp alternativ aplicat este dependentă de frecvența câmpului. Pentru fiecare contribuție la permittivitatea dielectrică totală, dispersia răspunsului dielectric este cel mai bine descrisă folosind o permitivitate dielectrică complexă:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - \mathrm{i} \cdot \varepsilon'' \tag{26}$$

unde $i = \sqrt{-1}$.

Permitivitatea dielectrică complexă a materialului, ε*, combină părțile elastice (ε') și inelastice (ε") ale răspunsului dielectric. Partea reală, ε', reprezintă practic permisivitatea dielectrică scrisă anterior ca ε_r, iar ε" este pierderea dielectrică care este egală cu $1/(\omega \cdot R_{AC})$ – unde R_{AC} este rezistența efectivă a materialului în câmpul electric alternativ de frecvență f (unde ω este frecvența unghiulară, 2πf). Prin urmare, partea reală a răspunsului dielectric este legată de proprietățile capacitive, în timp ce partea imaginară este legată de proprietățile rezistenței.

Tangenta de pierdere dielectrică, tgδ, poate fi scrisă ca o disipare normalizată:

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{27}$$

și este legat de raportul dintre „energie de pierdere" și „energie reactivă".

Atât părțile reale (ε') cât și cele imaginare (ε") ale răspunsului dielectric pot fi extrase din măsurători electrice simple ale unei probe dielectrice. Un material dielectric bun are $\mathrm{tg}\delta < 10^{-4}$, ceea ce îl face relativ insensibil la frecvența câmpului alternativ aplicat.

5. Aplicații și interes pentru dezvoltarea materialelor dielectrice noi

Materialele dielectrice pot fi solide, lichide sau gaze. Gazele dielectrice utilizate în mod obișnuit sunt: aerul, azotul și hexafluorura de sulf; vidul înalt poate fi considerat și dielectric, fără pierderi dielectrice, chiar dacă constanta sa dielectrică relativă este egală cu 1. Dielectricii lichizi (ulei mineral, ulei de silicon, esteri organici etc.) sunt folosiți ca izolatori electrici (atât electric, cât și termic) pentru bobinele transformatoarelor electrice; fluidele dielectrice cu constantă dielectrică mai mare (adică uleiul de ricin) sunt utilizate în condensatoarele de înaltă tensiune pentru a preveni descărcarea corona și pentru a crește capacitanţa. Dielectricii solizi sunt cu siguranță cei mai folosiți dielectrici în inginerie electrică, în general ca: a) materiale electroizolante pentru acoperirea sau împachetarea firelor și cablurilor care transportă curent electric (majoritatea materialelor plastice,

hârtie izolatoare electrică, porțelan și sticlă) sau b) ca componente dielectrice în dispozitive electronice (ceramice), cum ar fi redresoare, traductoare și amplificatoare.

De obicei, dielectricii sunt clasificați în funcție de valorile permisivității dielectrice:

1) permitivitate scăzută a) ca izolatori de joasă tensiune (simpli), cum ar fi materiale pentru plăci de circuite imprimate (PCB) sau b) ca izolatori de înaltă tensiune în liniile electrice.

2) materiale cu permitivitate medie (non-feroelectrice) ca condensatoare și rezonatoare dielectrice cu microunde.

3) condensatori cu permisivitate mare: dielectrici polari, cum ar fi dispozitivele piroelectrice și piezoelectrice, sau memoriile feroelectrice cu acces aleator.

Proprietățile necesare pentru un „dielectric bun" sunt: constantă dielectrică ridicată, pierderi dielectrice scăzute, stabilitate termică, coeficienți de temperatură reglabili, factori de înaltă calitate la multe frecvențe, defalcare intrinsecă ridicată pentru aplicațiile cu putere de impuls și rezistență la interferența de la câmpurile electromagnetice.

Permitivitățile dielectrice variază, în general, de la 4,5 până la mult peste 100. Ceramica cu permitivitate scăzută (4,5-10) este utilizată ca suport pentru rezonatoarele dielectrice avansate; dintre acestea, dielectricii pe bază de silicat de magneziu aluminiu și compuși de silicat de magneziu au permittivitatea dielectrică între 4,5 și 6, în timp ce două materiale cu permitivitate dielectrică similară: Al_2O_3 (ε'_{Al2O3} = 9,5) și MgO (ε'_{MgO} = 10) au o permitivitate modestă, și respectiv o conductivitate termică remarcabilă. Dielectricii cu ε' în intervalul 13-16 se bazează pe compuși Mg_2TiO_4 și $MgTiO_3$, în timp ce $CaTiO_3$ care are o permitivitate dielectrică foarte mare (150-160), prezintă, din păcate, o pierdere dielectrică mare. Ceramica compozită de Mg_2TiO_4, $MgTiO_3$ și $CaTiO_3$ s-a dovedit a fi compatibilă și poate acoperi cu succes intervalul ε' = 13-150. Cu toate acestea, ceramica cu pierderi reduse pe bază de $BaTiO_3$ acoperă intervalul ε' = 37-100; $BaTi_4O_9$ acoperă intervalul ε' = 37-39, în timp ce $Ba_2Ti_9O_{20}$ cu TiO_2 suplimentar ridică rapid permisivitatea dielectrică de la 39 la 100.

În primul caz al materialelor cu permisivitate scăzută utilizate pentru fabricarea semiconductoarelor (dielectrici low-κ), constanta dielectrică este apreciată relativ la dioxidul de siliciu (ε'_{SiO2} = 3,9), care este materialul izolator utilizat în principal în cipurile de siliciu. Prin înlocuirea SiO_2 cu dielectrici low-κ de aceeași grosime, pot fi obținute viteze de comutare mai mari și o disipare mai mică a căldurii. Există multe materiale cu permitivitate dielectrică mai mică, dar doar câteva dintre ele pot fi integrate eficient într-un proces de fabricație; dintre acestea, toate sunt pe bază de SiO_2: dioxid de siliciu dopat cu fluor, dioxid de siliciu dopat cu carbon, dioxid de siliciu poros dopat cu carbon, dielectrici

polimerici organici cu spin sau dielectrici polimerici pe bază de siliciu. Pentru izolatoare sau dispozitive cu senzor, stocarea încărcăturii nu este crucială, se dorește o pierdere dielectrică scăzută și o rezistivitate ridicată în loc de o capacitate mare sau o constantă dielectrică ridicată.

Pe de altă parte, interesul pentru dezvoltarea de noi materiale și dispozitive dielectrice solide este în continuă creștere, deoarece acestea sunt componente valoroase și versatile în industria electronică de consum. Capacitatea lor de a permite sarcinilor electrice din interiorul lor să se miște atunci când sunt supuse unui câmp electric, rămânând în același timp izolatori, le-a făcut materiale utile ca condensatori, rezonatoare pentru comunicații mobile, dispozitive de stocare a datelor și alte componente electrice într-o gamă largă de aplicații comerciale. În cazul condensatoarelor fabricate comercial, un material dielectric solid cu permitivitate ridicată este de obicei folosit ca mediu de barieră între sarcinile pozitive și negative, în timp ce o sarcină mai mare poate fi stocată la o anumită tensiune (adică ceramică cu structuri centrosimetrice, cum ar fi titanații). a metalelor din grupa 2); prin urmare, aceste materiale posedă capacități mai mari, în timp ce pentru a funcționa cu succes la tensiuni înalte, acestea au fost rezistente la ionizare. Condensatorii sunt adesea un amestec de mai multe ceramice cu dependențe diferite de temperatură, datorită necesității de a fi materiale independente de temperatură; capacitanţa rezultată prezintă doar variații mici și aproximativ liniare legate de temperatură. Pentru cazul antenelor rezonatoare dielectrice care funcționează la frecvențe de microunde și unde mm, constanta dielectrică este în intervalul 10-100 și practic fără pierderi dielectrice inerente; blocul ceramic dielectric poate fi de diferite forme și este montat pe un metal ca plan de masă. Aceste dispozitive de antenă rezonatoare sunt utilizate în echipamentele radar fără fir și militare și, de asemenea, în telefoanele mobile de consum.

Permitivitățile ridicate ale dielectricilor polari precum piezoelectricii sau feroelectricii le-au făcut deosebit de utile în dispozitivele electronice, de asemenea cu o utilizare eficientă ca condensatori și rezonatoare. Feroelectricii pur de ordinul întâi sunt rar utilizați în aplicațiile dispozitivelor electronice din cauza dependenței accentuate de temperatură a permisivității dielectrice la temperatura de tranziție; prin urmare, feroelectricii de ordinul doi care conțin o varietate de medii dipol dau naștere la tranziții de fază difuze care au ca rezultat lărgirea vârfurilor peste care dipolii sunt polarizabili printr-un câmp electric aplicat. Prin reglarea compoziției materialelor feroelectrice apar regiuni de non-feroelectricitate, rezultând o nouă clasă de materiale și anume feroelectricii relaxori; aceste materiale prezintă, de asemenea, vârfuri dielectrice largi care suferă tranziții de fază difuză, dar datorită distribuției mediilor, ele prezintă dependență de frecvență în poziția permitivității dielectrice și pierderi cu temperatura. Fenomenul feroelectric relaxor a fost

observat în materialele ceramice timp de aproape patru decenii; de exemplu, PMN-PT este un relaxor tipic feroelectric, cu efect piezoelectric mare și anizotropie optică.

Proprietățile feroelectrice și relaxoare, precum și exemple de astfel de materiale și aplicațiile acestora vor fi fiscutate în cadrul alor cursuri. Pe lângă aplicațiile descrise mai sus, feroelectricii monocristalnici cu coeficienți electro-optici (E-O) înalți pot suferi sub un câmp electric extern o modificare mare a indicelui de refracție datorită apropierii unei limite de fază morfotropă; aceste materiale sunt utilizate pe scară largă în multe dispozitive optice, cum ar fi modulatoare E-O, comutatoare, schimbătoare de frecvență și supape de lumină.

În zilele noastre, toate vehiculele de transport, sistemele automate din industrie și chiar majoritatea bunurilor de uz casnic se bazează sau sunt realizate prin utilizarea dispozitivelor electronice care se bazează pe circuite integrate și care necesită o dezvoltare continuă și personalizare a proprietăților. Odată cu cererea de creștere a puterii de procesare a computerelor, piața a fost inundată de diverși condensatori ceramici multistrat care au condus la o mai mare apreciere a cercetărilor privind relația dintre compoziția chimică, structura și proprietățile electrice ale noilor materiale dielectrice.

6. Structura benzilor de energie la izolatori electrici

În general, în izolatori, banda de valență este plină. Următoarea bandă de energie permisă (banda de conducţie) este separată de o bandă interzisă mare. Cu cât banda interzisă este mai mare, mai puțini electroni din banda de valență au suficientă energie termică pentru a trece în banda de conducție (practic niciun electron nu este scos dintr-o legătură chimică şi a-l lăsa liber în material), și astfel, aceste materiale sunt izolatori foarte buni.

Teoretic, izolatorii au o rezistivitate electrică infinită şi nu ar trebui să conducă deloc curentul electric. Totuşi, în realitate, aceste materiale au o rezistivitate electrică finită, dar foarte mare. Aceasta face ca printr-un dielectric aflat la o tensiune electrică mare să aveam (în regim continuu) un anumit curent de scurgere. La aplicarea tensiunii exterioare, curentul prezintă o creştere abruptă, după care scade asimptotic către o valoare constantă numită curent rezidual. În acest domeniu al curentului rezidual se defineşte rezistivitatea electrică. Izolatorii electrici sunt aşadar materiale care se opun trecerii curentului electric, deci prin care nu circulă un curent de conducţie electrică. În realitate, rezistivitatea izolatorilor nu este infinită, ci are o valoare cuprinsă între 10^7 şi 10^{17} $\Omega \cdot m$.

Din punct de vedere al structurii benzilor de energie, izolatorii au (ca şi semiconductorii) benzi permise, fie total ocupate cu electroni, fie total goale (fără electroni), care sunt numite benzi interzise (Fermi); aceast tip de bandă fiind foarte largă, atunci energia benzii interzise W_g este > 4 eV.

Astfel, izolatorii au la temperatura T = 0 K benzile permise fie complet ocupate, fie complet goale (Figura 8). Nivelul Fermi E_F trece prin mijlocul unei benzi interzise de lăţime mare (W_g > 4 eV), numită bandă interzisă Fermi (sau, de obicei, doar bandă Fermi). Banda permisă complet ocupată, situată sub E_F (W_F) se numeşte bandă de valenţă (după cum am spus şi anterior), B_V, iar banda permisă complet goală situată deasupra lui E_F se numeşte bandă de conducţie (după cum am spus şi anterior), B_C. Deoarece energia medie a unui electron este kT ≈ 0,025 eV la temperatura ambiantă (T ≈ 300 K), electronii din B_V nu pot escalada banda interzisă Fermi (după cum am spus şi anterior), B_I, pentru a trece în banda de conduţie, B_C. Astfel, nici în B_V şi B_C nu există niveluri partial ocupate, şi deci nu există electroni de conducţie. Intervalul $\delta_F \approx 4kT$ (≈ 0,1 eV la T = 300 K) este evident gol, deoarece el este complet inclus în banda interzisă Fermi.

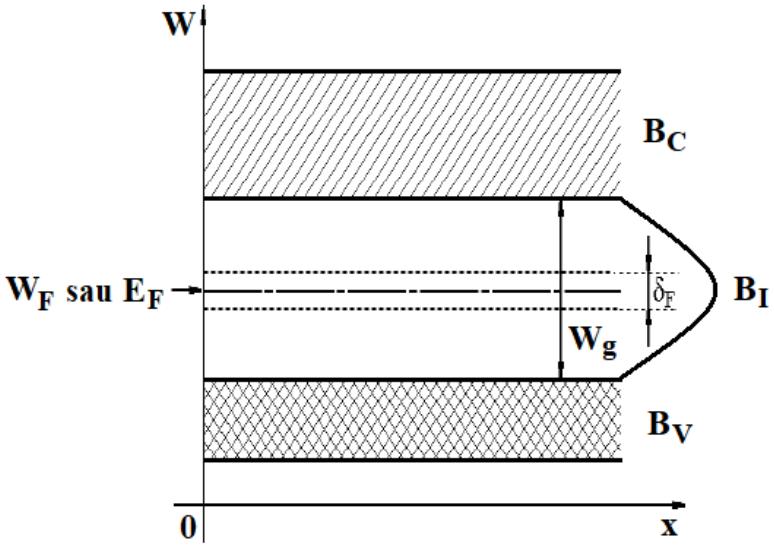

Figura 8. Structura benzilor de energie ale unui izolator electric

7. Curentul de absorbţie şi curentul de conducţie

Atunci când se introduce un izolator între doi electrozi şi se aplică brusc o tensiune electrică continuă, se constată că apare un curent electric care la început creşte brusc la o valoare foarte mare şi care apoi descreşte asimptotic în timp către o valoare constantă. Componenta curentului care descreşte (asimptotic) în timp şi care se suprapune peste curentul de conducţie (constant în timp) se numeşte curent de absorbţie (Figura 9).

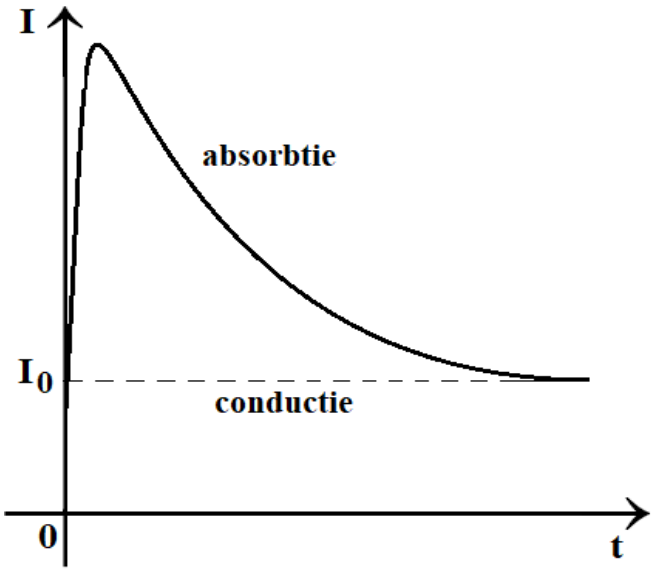

Figura 9. Curentul de absorbţie şi de conducţie într-un izolator

Explicaţia acestei evoluţii a curentului este aceea că, după aplicarea tensiunii, curentul care apare are 4 componente:

1. o componentă corespunzătoare încărcării cu sarcină electrică a armăturilor condensatorului. De fapt are loc separarea sarcinilor electrice în vecinătatea armăturilor. Această componentă durează în timp, $\tau = RC$, unde R este rezistenţa electrică a izolatorului şi C este capacitanţa condensatorului care are drept dielectric izolatorul studiat.

2. O componentă corespunzătoare polarizării (de diferite tipuri) izolatorului. Această componentă descreşte în timp după o lege τ^{-n}, unde $n > 1$.

3. O componentă corespunzătoare unui curent de conducţie care corespunde formării aglomerărilor de sarcină spaţială. Acest curent descreşte în timp până la anulare.

4. O componentă corespunzătoare unui curent de conducţie invariabil în timp.

Prima şi a doua componentă durează foarte puţin (câteva sutimi de secundă), în timp ce a treia componentă durează mai mult (minute sau ore).

Deoarece atunci când se aplică o tensiune continuă, valoarea iniţială a rezistivităţii este relativ mică, trebuie ca rezistivitatea (ρ) să fie determinată după un anumit timp de la aplicarea tensiunii, după care curentul care circulă prin material este numai curent de conducţie.

8. Mecanisme de conducţie în izolatori electrici

În izolatori se disting 3 tipuri de conducţie:

- Conducţie electrică: realizată de electroni; Mişcarea electronilor liberi apare prin efect fotoelectric, prin injecţie din electrod sau prin mişcarea sarcinilor prin salt între ionii aceluiaşi element, dar de valenţă diferită.
- Conducţia molionică (electroforetică). Are lor prin mişcarea ionilor moleculari sau a grupelor de molecule ionizate; se întâlneşte în special la dielectricii amorfi şi lichizi, în sistemele coloidale la contactul dielectric-ulei (grăsime).
- Conducţie ionică: realizată de ioni (electrolitică). Are loc prin migrarea ionilor pozitivi şî negativi în câmpul electric exterior, ionii fiind fie ai materialului de bază, fie ai impurităţilor, sau prin mişcarea ionilor prin vacanţe, având ca rezultat o migrare a vacanţelor.

Dacă materialul izolator conţine impurităţi care formează în banda interzisă Fermi niveluri suplimentare de tip donor sau de tip acceptor, atunci are loc o conducţie asigurată de electroni sau de goluri, ca în cazul semiconductorilor extrinseci. Într-un bun izolator, concentraţia de impurităţi este extrem de mică şi deci conducţia electrică corespunzătoare este practic neglijabilă. Pe de altă parte, o conducţie de tip intrinsec este practic inexistentă într-un izolator în condiţii uzuale de temperatură şi de câmp electric, deoarece din cauza lărgimii foarte mari a benzii interzise, un număr foarte mic de electroni efectuează tranziţii din banda de valenţă în banda de conducţie şi deci curentul electric datorat convecţiei lor este foarte slab. Ca urmare, într-un izolator suficient de pur, concentraţia de electroni (sau de goluri) de conducţie este foarte mică şi ea este independentă de câmpul electric pentru $E < 10^6$ V/m (în domeniul Ohm). Astfel, în acest domeniu, conductivitatea aferentă conducţiei electrice $\sigma_{electr.}$ este practic independentă de intensitatea câmpului electric E (Figura 3). În câmpuri electrice intense, când $E > 10^6$ V/m, concentraţia de purtători de sarcină creşte mult şi conductivitatea $\sigma_{electr.}$ creşte exponenţial cu intensitatea câmpului electric E (în domeniul Poole) – Figura 10.

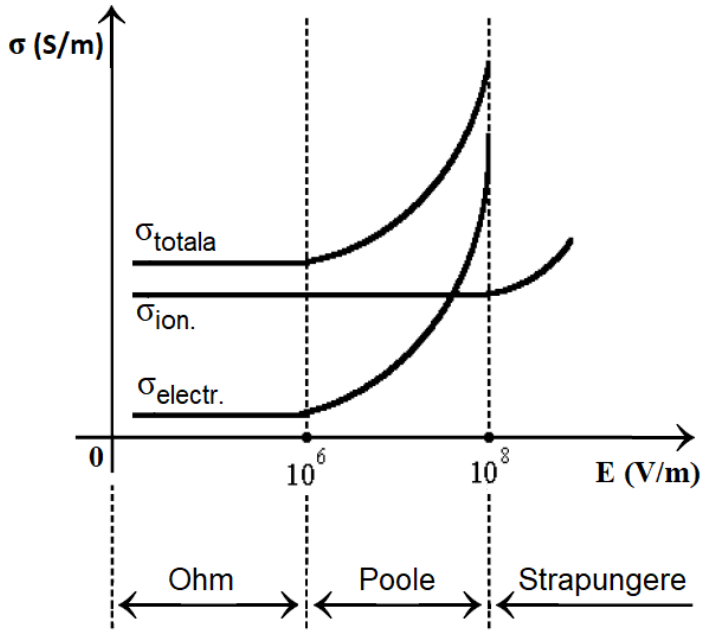

Figura 10. Variaţia conductivităţii izolatorilor cu intensitatea câmpului electric

În câmpuri uzuale, conducţia ionică se realizează prin convecţia ionilor proprii (dacă izolatorul este un cristal ionic) sau prin ioni de impuritate. Conductivitatea ionică nu depinde de intensitatea câmpului electric nici în domeniul Ohm şi nici în domeniul Poole.

9. Proprietăţi electrice ale dielectricilor

Structura benzilor de energie a materialelor electroizolante este caracterizată de o lărgime benzii interzise de valori mari, peste 4 eV. Din această cauză, în condiţii obişnuite de temperatură şi câmp electric, foarte puţini electroni pot efectua tranziţia din banda de valenţă în banda de conducţie şi, deci, curentul electric determinat de aceştia este foarte slab.

Dacă cristalul izolator conţine impurităţi ce formează niveluri discrete (acceptoare, donoare) în banda interzisă, se produce şi o conducţie prin electroni şi goluri ca la semiconductorii extrinseci. Într-un dielectric bun, impurităţile au însă o concentraţie extrem de mică şi, deci, conducţia electrică corespunzătoare este, de asemenea, nesemnificativă.

În câmpurile electrice obişnuite, conducţia electrică la izolatori se realizează mai ales prin deplasarea ionilor proprii (pentru cristale ionice) sau de impuritate. Se deosebesc deci, în materialele dielectrice, două tipuri de conducţie electrică: conducţia prin ioni, sau ionică şi conducţia prin electroni, sau electronică. În câmpurile electrice uzuale, când $E < 10^5–10^6$ V/m, conducţia electronică este foarte slabă şi predomină conducţia prin ioni. Cristalele suficient de pure cu alt tip de legătură decât cea ionică au conductivitatea electrică extrem de mică în câmpuri

electrice obişnuite, deoarece ea se realizează, practic, numai prin electroni. În acest domeniu de valori ale intensităţii câmpului electric, conductivitatea, ca şi la conductori, nu depinde practic de E (domeniul ohmic).

În câmpurile electrice intense, pentru care 10^5–10^6 V/m < E < 10^8 V/m, conductivitatea electronică creşte rapid cu E, tinzând către infinit în momentul străpungerii materialului, la valori ale câmpului de ordinul 10^8 V/m. În acest domeniu de valori ale intensităţii câmpului electric, numit *domeniu Pool*, conductivitatea electronică depinde sensibil de E.

Conductivitatea ionică nu depinde practic de intensitatea câmpului electric în nici un domeniu.

Conducţia electrică în lichide este realizată prin convecţia ionilor pozitivi sau/şi negativi care provin fie de la impurităţi, ale căror molecule se disociază la pătrunderea în lichid, fie de la moleculele proprii, dacă lichidul are molecule polare. Impurităţile pot fi solubile sau insolubile în materialul lichid; dacă sunt solubile, o parte din ele se disociază şi din acest proces rezultă purtători de sarcină electrică mobili. Conductivitatea electrică a unui lichid izolator are aceeaşi formă ca aceea a unui dielectric solid cristalin. Ea creşte exponenţial cu temperatura şi proporţional cu concentraţia ionilor proprii sau de impuritate. În lichidele nepolare (cu molecule nepolare) conductivitatea corespunde numai curentului de drift al ionilor de impuritate şi are valori foarte mici, astfel că dielectricii lichizi nepolari puri au bune calităţi izolante. Uleiul de transformator, de exemplu, care este nepolar, pur are o rezistivitate foarte mare, aşa cum se poate vedea în **Tabelul 1**. Solidele amorfe au comportări asemănătoare cu cele ale lichidelor, ele putând fi considerate ca lichide suprarăcite.

Conducţia electrică a gazelor se datorează deplasării purtătorilor de sarcină electrică obţinuţi ca urmare a ionizării (prin ciocniri, iradiere cu radiaţii ionizante etc.) a moleculelor gazului, care, în mod obişnuit sunt neutre. Purtătorii de sarcină pot fi şi electronii emişi de electrozi metalici. Electronii, la rândul lor, se pot asocia cu moleculele, formând ioni negativi moleculari. O parte dintre purtătorii pozitivi se recombină cu cei negativi. Acest proces, împreună cu procesul de formare a curentului de drift, conduce la scăderea concentraţiei purtătorilor de sarcină. Când se atinge echilibrul dinamic, în regim staţionar, numărul purtătorilor generaţi prin ionizări într-o regiune din spaţiu este egal cu al acelora care se recombină sau sunt antrenaţi în curentul electric din acea regiune.

Tabelul 1. Proprietăţi electrice ale unor materiale

Material	ρ (Ω·m) (U_r = 0%)	ε_r	E_{str} (MV/m)
Parafină tehnică	10^{14}	1,9 ÷ 2,2	
Polietilenă, polistiren,	$10^{15} \div 10^{16}$	2,5 ÷ 2,8	90 ÷ 120
Plexiglas	10^{13}	3,4	90 ÷ 120
Hârtie	$10^{14} \div 10^{15}$		7
Mică	$10^{14} \div 10^{15}$	7,5	100
Sticlă	$10^{10} \div 10^{13}$	4 ÷ 14	100 ÷ 300
Ulei de transformator	10^{16}	2,2	20 ÷ 30
Ulei siliconic	10^{12}	5	15 ÷ 20
Apă	10^{5}	81	
Aer	10^{16}	1	3,2
Cupru electrolitic	$172 \cdot 10^{-8}$		
Nichelină	$36 \cdot 10^{-8}$		
Constantan	$50 \cdot 10^{-8}$		
Aluminiu	$2{,}75 \cdot 10^{-8}$		
Fier	10^{-7}		
Platină	10^{-7}		
Wolfram	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$		

În câmpuri electrice slabe şi la temperaturi nu prea mari, ciocnirile dintre particule sunt rare, astfel încât cauza apariţiei purtătorilor de sarcină este, în principal, existenţa unor agenţi de ionizare externi; încetarea acţiunii acestora conduce la recombinarea purtătorilor de sarcină şi, deci, la dispariţia curentului electric.

În câmpuri electrice intense, purtătorii de sarcină sunt puternic antrenaţi în curentul electric şi recombinarea lor este neglijabilă. Ca urmare, se atinge o valoare de saturaţie, practic independentă de intensitatea câmpului electric, a densităţii de curent, când practic toţi purtătorii de sarcină electrică liberi sunt antrenaţi în curentul electric.

În câmpuri electrice foarte intense, purtătorii de sarcină capătă prin accelerare energii suficient de mari pentru ca, prin ciocniri, să ionizeze moleculele gazului şi să determine formarea în avalanşă a unor noi purtători de sarcină electrică liberi, ceea ce duce la apariţia unei descărcări electrice prin gaz. Procesul de ionizare prin ciocniri este, în acest caz, mult mai important decât cel determinat de agenţii exteriori, care poate fi neglijat; descărcarea electrică prin gaz este autonomă (neîntreţinută), deoarece se produce fără aport de energie din exterior.

Apariţia descărcării în avalanşă conduce la o creştere rapidă a densităţii de curent, dependentă de intensitatea câmpului electric.

În continuare sunt prezentate principalele proprietăţi şi mărimi fizice caracteristice materialelor electronice şi electrotehnice.

- **conductivitatea electrică**, σ constituie factorul principal în caracterizarea anumitor clase de materiale electronice şi electrotehnice; ea este strâns legată de structura, puritatea şi condiţiile de utilizare a materialelor.
- **rezistivitatea electrică**, ρ = 1/σ este mărimea inversă conductivităţii şi poate fi utilizată în locul acesteia.

Rezistivitatea dielectricilor este o caracteristică importantă a acestora, care este dependentă de numeroşi factori, dintre care cei mai importanţi sunt structura, conţinutul de impurităţi, temperatura, umiditatea, câmpul electric aplicat din exterior.

În dielectricii cu structură ionică, conducţia se realizează prin deplasarea ionilor care se separă în reţea, datorită agitaţiei termice; mobilitatea acestora depinde de dimensiunea razelor ionice, de numărul vecinilor de ordinul I, de modul de legare a ionilor în reţea, de valenţa ionilor (conducţia este mai intensă în cazul cristalelor cu ioni monovalenţi) şi de simetria cristalului (rezistivitatea dielectricului poate prezenta o anizotropie). În dielectricii cu structură moleculară (polietilenă, parafină etc.), rezistivitatea electrică este foarte mare, ea fiind determinată doar de conţinutul de impurităţi. Şi corpurile amorfe prezintă o rezistivitate electrică foarte mare, determinată de compoziţia chimică, conţinutul de impurităţi, gradul de polimerizare, gradul de vulcanizare etc.

Impurităţile determină conductivitatea dielectricului conform relaţiei:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{0i} \cdot e^{-\frac{b_i}{T}} \tag{28}$$

unde constantele σ_{0i} şi b_i sunt caracteristice diferitelor tipuri de purtători de sarcină.

La creşterea temperaturii, se intensifică mişcarea de agitaţie termică a ionilor din reţeaua cristalină şi un număr mai mare dintre ei au o energie suficientă pentru a deveni liberi, crescând astfel concentraţia purtătorilor de sarcină electrică, ceea ce duce la scăderea rezistivităţii dielectricului.

Umiditatea determină apariţia unor noi specii de purtători de sarcină (ioni rezultaţi prin disocierea impurităţilor conţinute în apă sau a impurităţilor solubile conţinute în materiale, ioni de hidrogen şi oxigen rezultaţi din disocierea apei, grupe de molecule de apă electrizate etc.), ceea ce duce la scăderea rezistivităţii de volum a materialului (mai ales dacă acesta are o structură poroasă), chiar cu câteva ordine de mărime.

Influenţa câmpului electric asupra rezistivităţii are loc prin procesul de formare de sarcini electrice spaţiale în dielectrici, prin favorizarea proceselor de emisie a electrozilor şi de pătrundere a umidităţii, prin reducerea barierei de potenţial corespunzător contactului metal-izolator etc. Aceste fenomene devin

foarte importante în cazul câmpurilor electrice intense ($E > 10^5$–10^8 V/m), când devine preponderentă conducţia electronică.

Curentul electric are două componente: în volum şi de suprafaţă, pentru care se definesc două rezistivităţi:

- **rezistivitatea de volum**, ρ_V se defineşte din expresia rezistenţei volumice, pentru următoarele situaţii:

$R_V = \rho_V \cdot \frac{d}{S}$, dacă se pot neglija efectele de margine, adică dielectricul poate fi considerat un condensator plan cu suprafaţa S foarte mare şi distanţa dintre electrozi d foarte mică;

$R_V = \frac{\rho_V}{2\pi d} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1}$, dacă dielectricul poate fi considerat un condensator cilindric;

$R_V = \frac{\rho_V}{2\pi d} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$, dacă dielectricul poate fi considerat un condensator cilindric foarte subţire.

- **rezistivitatea superficială**, ρ_S se defineşte convenţional, pentru materialele solide, ca fiind numeric egală cu rezistenţa, măsurată în curent continuu, a unui dreptunghi delimitat la suprafaţa materialului prin doi electrozi paraleli, în formă de cuţit; dacă ℓ reprezintă lungimea electrozilor şi d distanţa între ei, rezistenţa peliculei de pe suprafaţa materialului prin care trece curentul I este:

$R_S = \rho_S \cdot \frac{d}{\ell}$, din care pentru $d = \ell$ se obţine $\rho_S = R_S$.

Pentru electrozi circulari, formula rezistivităţii superficiale va fi:

$R_S = \frac{\rho_S}{2\pi} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1}$ sau $R_S = \frac{\rho_S}{2\pi} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$.

Valoarea rezistivităţii superficiale depinde de compoziţia chimică şi structura materialului, de conţinutul de impurităţi solubile din material, de nivelul de oxidare, de starea de prelucrare a suprafeţei, de temperatură, de puritatea, umiditatea şi presiunea mediului ambiant, etc.

Măsurarea rezistivităţii superficiale cu electrozi plani (a) şi cu electrozi inelari (b) este redată în **Figura 11**.

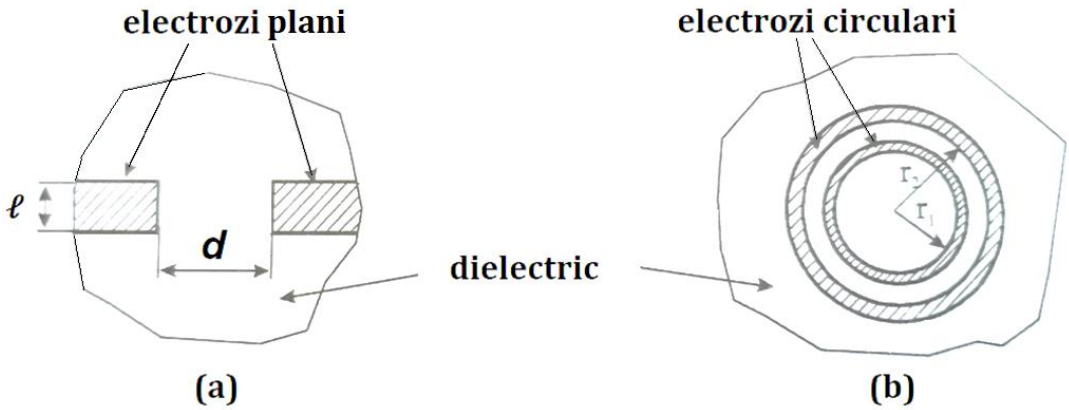

Figura 11. Tipuri de electrozi: (a) electrozi plani şi (b) electrozi circulari

Alte proprietăţi importante ale izolatorilor sunt:

- **permitivitatea electrică relativă**, ε_r caracterizează starea de polarizare electrică a corpurilor şi se determină valoric cu relaţia $\varepsilon_r = C_d/C_0$, unde C_d reprezintă capacitanţa condensatorului (de obicei plan) care are ca dielectric materialul studiat, iar C_0 capacitanţa aceluiaşi condensator având ca dielectric aerul; are valori cuprinse între 1 (pentru gaze) şi 10^3 (pentru materiale feroelectrice). Permitivitatea electrică depinde de parametrii tensiunii aplicate, de solicitările mecanice ale corpului, de starea de umiditate, de temperatură, de presiune, de umiditate etc.
- **rigiditatea dielectrică**, $E_{str.}$ reprezintă valoarea minimă a intensităţii câmpului electric pentru care materialul se străpunge; se calculează ca raport dintre tensiunea $U_{str.}$, la care are loc străpungerea corpului (în câmp uniform) şi distanţa d dintre electrozii între care se află corpul: $E_{str.} = U_{str.}/d$.

Străpungerea dielectricilor este un fenomen ce caracterizează toate stările de agregare ale acestora. În cazul solidelor, spre deosebire de gaze, străpungerea provoacă o deteriorare a meterialelor. Fenomentul de străpungere constă în creşterea rapidă a curentului electric prin dielectric peste o anumită valoare a tensiunii aplicate, dielectricul neputându-şi îndeplini rolul său de izolator electric. Valoare tensiunii la care are loc o creştere rapidă a curentului se numeşte tensiune de străpungere, $U_{str.}$, iar câmpul electric corespunzător acesteia se numeşte câmp electric de străpungere, $E_{str.}$, sau rigiditate dielectrică.

În **Figura 12** se prezintă curba curent electric–tensiune electrică a unui dielectric:

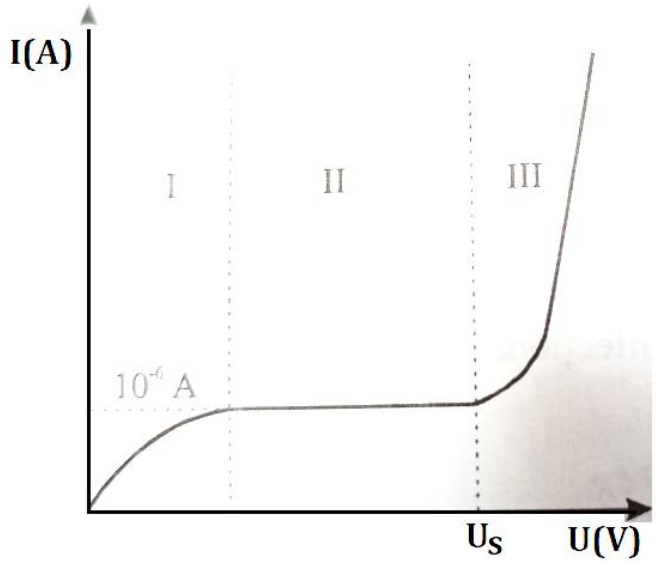

Figura 12. Curba curent electric–tensiune electrică a unui dielectric

În această figură se observă 3 regiuni distincte:

I. Regiunea I – comportament Ohmic;
II. Regiunea II – regiune de saturaţie;
III. Regiunea III – regiune de străpungere.

Intensitatea câmpului electric de străpungere $E_{str.}$ depinde de mai mulţi parametri, cum ar fi*: temperatura, frecvenţa şi durata aplicării tensiunii electrice pe probă, grosimea şi omogenitatea probei, direcţia cristalografică de aplicare a tensiunii, gradul de puritate al materialului, prezenţa în material a porilor, a incluziunilor de gaze şi a umidităţii, de presiunea atmosferei ambiante, de tipul şi de forma electrozilor*.

Străpungerea dielectricilor are loc prin 3 mecanisme fundamentale de străpungere:

a) Străpungerea termică: existenţa unui curent mic de conducţie poate încălzi dielectricul prin efect Joule mai repede decât poate fi disipatăaceastă căldură, ceea ce are ca efect creşterea temperaturii şi posibilitatea excitării din banda de valenţă în banda de conducţie;

b) Străpungerea intrinsecă: este de natură electronică, fiind generată de apariţia unor electroni în banda de conducţie, sub influenţa câmpului electric intens, fie datorită existenţei unor capcane pentru electroni (impurităţi donoare, straturi intergranulare, dislocaţii), fie formării de electroni liberi prin tunelare zonă-zonă;

c) Străpungerea în avalanşă (prin descărcare): este analogă străpungerii gazelor prin descărcare electrică şi se datorează formării de avalanşe de sarcini electrice spaţiale. Sursa de electroni necesară iniţierii de avalanşe poate fi injectarea de electroni din electrod prin tunelare sau prin emisie termoelectronică, ionizarea particulelor constituente ale materialului, radiaţia cosmică, etc.

Câmpurile de străpungere au intensităţi de peste 10^7–10^8 V/cm. Trebuie subliniat faptul că străpungerea sub tensiune alternativă are loc la valori mult mai mici decât străpungerea sub tensiune continuă, datorită pierderilor prin relaxare.

Străpungerea unui dielectric este în general un fenomen nedorit, care face materialul inapt pentru o folosire ulterioară. Rigiditatea dielectrică determinată experimental se numeşte **rigiditate dielectrică practică** şi depinde de caracteristicile experimentale.

Câmpul de străpungere depinde de starea de agregare a materialului dielectric, temperatură, grosimea probei, gradul de puritate şi omogenitate, forma electrozilor, natura şi caracteristicile mediului înconjurător, etc. Restabilirea proprietăţilor materialului după străpungeri accidentale poate fi parţială, în cazul lichidelor, sau totală, în cazul gazelor. În cazul solidelor, de obicei se creează canale de străpungere în material care nu mai permit restabilirea proprietăţilor dielectrice.

Străpungerea gazelor are loc prin generarea în avalanşă a unor purtători de sarcină (electroni, ioni), care se deplasează de la un electrod spre celălalt. Iniţierea avalanşei este determinată de un număr redus de electroni, existenţi în gaze, sau emişi de catod care, acceleraţi în câmpul electric exterior, acumulează o energie suficient de mare pentru a ioniza o moleculă a gazului şi a genera încă un electron. Cei doi electroni vor ioniza în continuare alte două molecule (după acumularea energiei necesare) şi aşa mai departe. Rigiditatea dielectrică a gazelor creşte cu creşterea distanţei dintre electrozi, cu creşterea presiunii şi cu scăderea temperaturii.

Tensiunea de străpungere a aerului este dată de relaţia:

$$U_{str} = 2{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{p \cdot U_0}{T} \tag{29}$$

unde p şi T reprezintă presiunea (N/m^2), respectiv temperatura aerului (K), iar U_0 tensiunea de străpungere (V), determinată în condiţii normale ($p_0 = 10^5$ N/m^2, $T_0 = 293$ K).

În cazul aplicării unor impulsuri de tensiune, străpungerea se produce la tensiuni mult mai ridicate decât în cazul aplicării unei tensiunii continue.

În stare foarte pură, dielectricii lichizi au rigiditate dielectrică considerabilă, putând atinge 100 MV/m. Mecanismul ionizării prin ciocnire se produce şi în acest caz, dar drumul liber mediu este mult mai mic. Dielectricii lichizi de puritate tehnologică (conţinând diverse particule mecanice, apă, bule de gaze etc.) au o rigiditate mai mică, de regulă nedepăşind 20-25 MV/m.

Rigiditatea dielectrică a dielectricilor lichizi este influenţată de impurităţi, temperatură, presiune (creşte cu creşterea presiunii), natura electrozilor, starea de prelucrare şi puritatea suprafeţelor acestora, distanţa dintre electrozi, frecvenţa şi forma de variaţie a tensiunii de străpungere.

Există un mare număr de mecanisme de străpungere a dielectricilor solizi:

În cazul dielectricilor neomogeni din punct de vedere macroscopic, străpungerile prin ionizare în incluziunile gazoase constituie mecanismul dominant. Străpungerea în incluziunile gazoase favorizează străpungerea dielectricului solid în continuare, dar mecanismul poate fi diferit de la un material la altul.

În cazul dielectricilor solizi anorganici străpungerea în incluziunile gazoase conduce la creşteri locale de temperatură care facilitează străpungerea termică sau fisurarea materialului.

Străpungerile din incluziunile gazoase în dielectricii solizi organici favorizează în general străpungerea ulterioară a solidului prin următoarele mecanisme: bombardament cu electroni şi ioni rezultaţi din ionizarea gazului, temperaturi ridicate local, acţiunea chimică mai îndelungată a unor produse ca oxizii de azot, ozonul, care produc oxidări.

Străpungerea termică are loc astfel: curentul de conducţie (datorat unor sarcini electrice libere), ca şi fenomenele de relaxare în dielectrici (în current disipată prin conducţie termică; prin creşterea temperaturii dielectricului, are loc o creştere a ratei de generare termică a sarcinilor libere; se produce astfel o topire parţială, locală a dielectricului, însoţită şi de o descompunere chimică parţială. De regulă apar crăpături neregulate largi, spre deosebire de străpungerea intrinsecă şi în avalanşă ce provoacă apariţia de canale fine (de ordinul a 10 μ). Străpungerea termică are o durată de declanşare de ordinul secundelor, minutelor, mergând până la câteva ore.

Străpungerea electrochimică este legată de existenţa unui curent ionic în dielectricul supus un timp îndelungat unui câmp electric continuu. Procesul este de lungă durată, de sute şi mii de ore, fiind favorizat de temperaturile ridicate, care măresc conducţia şi accelerează reacţiile chimice distructive.

Străpungerea intrinsecă are loc în intervale de timp foarte scurte, de ordinul zecilor de nanosecunde şi este legată de existenţa electronilor liberi proveniţi de pe nivelurile donoare ale impurităţilor, polarizarea interfacială în materialele policristaline, dislocaţii, tunelarea bandă-bandă etc. Acest fenomen este caracteristic unor sticle, polimeri solizi, mică electrotehnică etc. şi are loc de regulă sub temperatura camerei, mergând în unele cazuri până la 100–150 °C. Acest tip de străpungere nu depinde de forma sau durata pulsului electric, ci numai de intensitatea lui. De asemenea, nu depinde de natura şi geometria electrozilor sau de forma şi dimensiunea probelor. Toate aceste caracteristici ale străpungerii susţin natura electronică a fenomenului, motiv pentru care fenomenul este denumit uneori şi străpungere electronică.

Rigiditatea dielectricilor solizi depinde de:

- structura fizică şi compoziţia chimică a dielectricului; astfel, corpurile cu structură compactă (mica, sticla) au rigiditatea dielectrică mult mai mare decât cele cu structură poroasă (hârtie, azbest), la care străpungerea are loc atât în materialul propriu-zis cât şi în aerul conţinut în porii materialului.
- geometria şi natura electrozilor; dacă electrozii au muchii ascuţite, în aceste zone câmpul electric este foarte intens şi favorizează apariţia şi dezvoltarea procesului de străpungere la o valoare mai mică a tensiunii aplicate; creşterea ariei suprafeţelor electrozilor determină o reducere a rigidităţii dielectrice, întrucât creşte numărul de defecte din materialul de încercat şi deci şi probabilitatea de iniţiere a unui proces de străpungere a materialului; de asemenea, rigiditatea dielectrică depinde şi de natura electrozilor, deoarece valorile lucrului mecanic de extracţie a electronilor diferă de la un metal la altul.
- geometria dielectricului; tensiunea de străpungere depinde direct proporţional de grosimea materialului dielectric.
- mediul ambiant.

 temperatură.
 forma şi durata de aplicare a tensiunii de străpungere şi frecvenţa acesteia.

- **factorul de pierderi (disipare)**, tgδ caracterizează pierderile totale de energie în dielectrici, datorită polarizării, conducţiei şi descărcărilor electrice; unghiul de pierderi dielectrice, reprezintă complementul unghiului de defazare dintre tensiunea u aplicată şi curentul total, i care străbate dielectricul aflat între armăturile unui condensator.

Factorul de pierderi depinde de frecvenţa tensiunii, de temperatură şi de umiditate.

Sub acţiunea prelungită a influenţelor exteriore de diferite naturi (mecanice, electrice, termice, radiaţii etc.), în materialele dielectrice au loc procese fizicochimice ireversibile, care duc la o degradare continuă a proprietăţilor lor, astfel încât, după un anumit timp, ele nu mai îndeplinesc condiţiile pentru care au fost alese.

Procesele care intervin în degradarea dielectricilor sunt variate şi numeroase. Astfel, toate materialele izolante suferă un proces lent de oxidare, în urma căruia apare un efect de reticulare, ceea ce duce la scăderea elasticităţii şi plasticităţii lor. Au loc, de asemenea, reacţii de depolimerizare care contribuie la scăderea rezistenţei mecanice a materialelor, la apariţia unor cavităţi în care se dezvoltă descărcări electrice etc. La degradarea dielectricilor mai contribuie şi procesele de hidroliză, incompatibilitatea chimică între constituenţi, prezenţa solvenţilor (incomplet evacuaţi) etc.

Îmbătrânirea materialelor izolante, adică înrăutăţirea proprietăţilor fizicochimice este direct legată de viteza de desfăşurare a acestor reacţii chimice. Se poate defini o durată de viaţă D a dielectricului (referitoare la o anumită proprietate) ca fiind intervalul de timp de la începerea procesului de degradare până când acesta a ajuns la stadiul considerat.

10. Tipuri de materiale dielectrice şi aplicaţii

Materialele electroizolante sunt în număr foarte mare şi, ca urmare a dezvoltării rapide a producţiei unor materiale cu proprietăţi şi utilizări tot mai diverse, o clasificare exhaustivă este extrem de dificilă. Se pot face diferite clasificări, utilizând diferite criterii.

O primă clasificare este cea în funcţie de starea de agregare, aşa cum se poate vedea în continuarea acestui paragraf. O altă clasificare se poate face în funcţie de stabilitatea termică, în şapte clase de izolaţie. Ea ţine seama doar de comportarea materialelor la acţiunea temperaturii:

- Clasa de izolaţie Y 90 °C. Cuprinde materiale textile (bumbac, mătase naturală, fibre de celuloză, acetat de celuloză şi poliamidice), hârtii şi

cartoane electroizolante, lemn, polietilenă, polistiren, poliacrilaţi, policlorură de vinil, cauciuc natural vulcanizat etc.

- Clasa de izolaţie A 105 °C. Cuprinde materiale textile, ţesături şi tuburi (bumbac, mătase naturală, celuloză, poliamide) lemn, hârtii, cartoane, emailuri şi răşini poliamidice, folii de triacetat de celuloză, poliamidice şi materiale combinate de tipul carton-folie, cauciucuri pe bază de butadienă cu acrilnitruri şi pe bază de clorbutadienă, azbociment impregnat cu substanţe organice.
- Clasa de izolaţie E 120 °C. Cuprinde pelicule de email sau lacuri polivinil acetalice, poliuretanice sau epoxidice, răşini epoxidice, poliesterice şi poliuretanice, folii şi fibre de tereftalat de polietilenă, compounduri termorigide pe bază de esteri acrilici cu umplutură anorganică, ţesături din tereftalat de polietilenă.
- Clasa de izolaţie B 130 °C. Cuprinde materiale pe bază de mică sau hârtie sau ţesături organice, fibre şi ţesături de sticlă şi azbest impregnate, mase plastice de formare cu umplutură anorganică şi materiale stratificate pe bază de sticlă şi azbest, pelicule izolante de email sau lacuri tereftalice, compounduri pe bază de răşini sintetice termoreactive.
- Clasa de izolaţie F 155 °C. Cuprinde materiale pe bază de mică sau hârtie, fibre de sticlă sau azbest, ţesături şi

tuburi flexibile din sticlă impregnată, răşini alchidice, epoxidice, poliesterice, răşini siliconice modificate.

- Clasa de izolaţie H 180 °C. Cuprinde materiale pe bază de mică, fire şi ţesături de azbest şi sticlă impregnate, mase plastice de formare cu umplutură anorganică, elastomeri siliconici, răşini şi lacuri siliconice.
- Clasa de izolaţie C > 180 °C. Mică, sticlă, produse din fibre de sticlă, ceramici, cuarţ, ardezie, micalex, politetrafluoretilenă, compuşi anorganici şi răşini siliconice cu stabilitate termică peste 225 °C.

O altă clasificare se poate face după compoziţia chimică, în materiale organice, intermediare (cu proprietăţi între cele ale materialelor organice şi cele anorganice) şi anorganice.

Materialele electroizolante se mai pot clasifica în funcţie de componenta principală a materialului finit (mică, răşini sintetice, lac etc.), de domeniul de utilizare (izolaţie de crestătură, între straturi, materiale de impregnare, de acoperire etc.), după comportarea la solicitări termice (termoplastice şi termorigide) etc.

10.1. Materiale dielectrice gazoase

În general, gazele sunt materiale izolatoare. **Tabelul 2** prezintă permitivitatea electrică relativă a unor gaze.

Tabelul 2. Permitivitatea electrică relativă a unor gaze

Gaz	Permitivitate relativă ε_r la 293 K şi 1 atm
Heliu	1,000072
Hidrogen	1,00027
Oxigen	1,00055
Argon	1,00056
Azot	1,00060
Dioxid de carbon	1,00098
Etilenă	1,00138

Ca izolant sau impuritate, aerul se află în toate schemele de izolaţie ale instalaţiilor electrice. Proprietăţile sale dielectrice sunt satisfăcătoare pentru câmpuri electrice mai puţin intense. Rigiditatea dielectrică a aerului e depinde de umiditate, temperatură şi presiunea la care se află şi ia valori foarte mari în cazul presiunilor înalte sau foarte reduse. Această caracteristică determină utilizarea aerului în construcţia condensatoarelor, a întrerupătoarelor de înaltă tensiune (cu vid sau cu aer comprimat) etc.

10.2. Materiale dielectrice lichide

Materialele dielectrice lichide se împart în două categorii: lichide electroizolante naturale (uleiul mineral, uleiul de ricin etc.) şi lichide electroizolante sintetice (clorurate, fluorurate, sau siliconice).

Uleiul mineral este un amestec de hidrocarburi naftenice (> 60%, foarte stabile şi cu un punct de congelare scăzut), aromatice (<30%, care conţin un număr mare de atomi de carbon ce se eliberează sub acţiunea arcului electric, reducând proprietăţile uleiului) şi parafinice (<30%, cu punct de congelare ridicat, determinând o creştere a viscozităţii), proprietăţile sale depinzând de compoziţia chimică, cât şi de condiţiile de exploatare.

După distilarea fracţiunilor mai uşoare (benzine, petrol) din reziduurile rămase (păcura) se separă fracţiuni uleioase, urmând o rafinare prin tratare cu acid sulfuric. Din primele astfel de fracţiuni se obţine uleiul de condensator cu viscozitate mică, pierderi mici ($\mathrm{tg}\delta \;\; 10^{-4}$–$10^{-3}$) şi rezistivitate ridicată ($\rho \approx 10^{11}$ $\Omega \cdot$m). Acest ulei este folosit în construcţia condensatoarelor de capacităţi mari, la impregnarea hârtiei, în amestec cu 10% colofoniu.

Prin distilarea în continuare a reziduurilor se obţine uleiul de transformator cu un conţinut mai mare de impurităţi şi apă, pierderi mai mari, rigiditate dielectrică mai scăzută. Fiind nepolar, are permitivitatea relativă redusă (2,1–2,4) şi slab variabilă cu temperatura şi frecvenţa (este practic independentă de frecvenţă la valorile uzuale în electrotehnică). Acest ulei este utilizat ca lichid electroizolant şi mediu de răcire în transformatoarele de mare putere şi mediu de stingere a arcului electric la întrerupătoarele de înaltă tensiune. Utilizarea lui este limitată la temperaturi ridicate de temperatura de aprindere de aproximativ 133 °C, iar la temperaturi scăzute de creşterea viscozităţii.

Uleiurile sintetice tind să înlocuiască uleiurile minerale care, deşi au proprietăţi dielectrice foarte bune, prezintă deficienţe importante în exploatare: inflamabilitate şi pericol de explozie, tendinţă de oxidare, îmbătrânire rapidă etc.

După natura chimică, uleiurile sintetice se grupează în uleiuri clorurate, fluorurate şi siliconice.

Dielectricii lichizi sintetici conferă deplină securitate împotriva incendiilor şi permit funcţionarea dispozitivelor în limite largi de temperatură. Sunt în schimb mai costisitoare decât uleiurile minerale. Hidrocarburile aromatice clorurate sunt cele mai utilizate, fiind neinflamabile şi având o mare stabilitate chimică.

Hidrocarburile fluorurate (esteri sau derivaţi vinilici fluoruraţi) au proprietăţi dielectrice mai bune, nu ard şi nu prezintă pericol de explozie, nu produc gaze toxice şi nu atacă izolaţiile cu care vin în contact, dar sunt mai costisitoare.

Uleiurile siliconice sunt materiale nepolare (dimetilxiloxani) cu temperaturi de aprindere ridicate (400ºC), permitivitatea 2,5–3 şi factorul de pierderi sub 10^{-3}. Se utilizează în construcţia unor transformatoare speciale şi la ungerea matriţelor pentru turnarea răşinilor sintetice sau a mecanismelor confecţionate din mase plastice.

10.3. Materiale dielectrice solide

10.3.1. Materiale dielectrice solide organice

Printre primele materiale solide organice utilizate ca izolatori electrici, au fost materialele din categoria substanţelor ceroase şi cea a bitumurilor şi asfalturilor.

Cerurile sunt materiale amorfe cu proprietăţi dielectrice bune, higroscopicitate mică, dar cu rezistentă mecanică, temperatură de topire şi conductivitate termică reduse (**Tabelul 3**). Au contracţie la răcire mare şi sunt solubile în uleiuri minerale şi clorurate. Cerurile naturale sunt puţin folosite în prezent, datorită proprietăţilor lor mecanice şi termice slabe, mai des utilizate fiind substanţele ceroase, atât cele nepolare (parafina, cerezina), cu proprietăţi dielectrice foarte bune, cât şi cele polare (uleiul de ricin hidrogenat, naftalina clorurată), cu caracteristici dielectrice mai slabe şi dependente de temperatură. Se

utilizează la fabricarea maselor de impregnare pentru conductoare şi condensatoare, a maselor de umplere a manşoanelor cablurilor şi cutiilor terminale etc.

Bitumurile sunt amestecuri amorfe de hidrocarburi, care conţin în cantităţi reduse oxigen şi sulf. Cele sintetice se obţin prin distilarea produselor petroliere, iar cele naturale, asfalturile, însoţesc zăcămintele de petrol.

Bitumurile au contracţie mare la răcire, sunt fragile la temperatura camerei, insolubile în apă şi alcooli şi solubile în hidrocarburi aromatice, uleiuri şi benzină. Temperatura de înmuiere variază între 50 şi 150°C şi creşte cu conţinutul de sulf. Se utilizează la fabricarea lacurilor de impregnare, a compoundurilor, ca mase de umplere, etc.

Tabelul 3. Proprietăţi ale unor materiale dielectrice ceroase şi bituminoase

Material	Densitate (kg/m^3)	Temperatură de topire (°C)	Rezistivitate de volum ($\Omega \cdot m$)	Permiti-vitate relativă, ε_r	Factor de pierderi tg δ	Rigiditate dielectrică E_{str} [MV/m]	Natura moleculei
Parafină	890 – 920	55	$10^{12} – 10^{15}$	2,3	$10^{-4} – 10^{-3}$	10 – 25	nepolară
Cerezină	900 – 950	50 – 60	10^{11}	2,2	10^{-3}	10 – 15	nepolară
Ulei de ricin hidrogenat	980	80 – 90	$10^{11} – 10^{13}$	10 – 30	0,1	25 – 40	polară
Bitum	1000 - 1100	170 – 200	10^{12}	2,4 – 3,3	$10^{-3} – 10^{-2}$	10 – 40	polară

Cele mai importante materiale dielectrice solide organice sunt însă solidele macromoleculare (polimeri liniari cu monomer cu două legături de valenţă, sau spaţiali cu monomer cu mai mult de două legături de valenţă). Pot fi naturali (celuloză, cauciuc, colofoniu, răşini fosile), obţinuţi prin prelucrarea industrială a unora naturali (esteri ai celulozei), sau sintetici.

Polimerii liniari sunt materiale termoplastice cu lanţuri foarte lungi, un grup reprezentativ al acestora, foarte utilizaţi în electrotehnică si electronică, fiind compuşii vinilici. Ei sunt polimeri formaţi din compuşi asemănători etilenei (C_2H_4), cu formula generică C_2H_3R, unde radicalul R poate fi clorul, rezultând policlorura de vinil, gruparea CH_3, rezultând propilena, gruparea acetat – CH_3COO, rezultând poliacetatul de vinil, gruparea benzen – C_6H_5, rezultând polivinilbenzenul (polistirenul), gruparea CN, rezultând poliacrilonitrilul etc.

Polimerii spaţiali sunt materiale sintetice termorigide, cu structură spaţială distribuită în toate direcţiile.

Polietilena (PE) este obţinută prin polimerizarea etilenei din stare gazoasă la presiuni ridicate (1000–2000 atm) şi temperaturi de aproximativ 200 ºC, rezultând polietilenă de mică densitate - LDPE, instabilă în timp, uşor oxidabilă, care se

întăreşte şi devine casantă, sau la temperatură şi presiune mult mai scăzute (~ 1 atm), dar în prezenţa unui catalizator, rezultând polietilenă de densitate ridicată – HDPE, cu proprietăţi mecanice mai bune şi temperatura de înmuiere mai ridicată. Gradul de cristalinitate este de aproximativ 60% pentru LDPE, ajungând până la 90%, pentru HDPE. Polietilena este inertă chimic, având o bună stabilitate la acizi şi baze, dar este atacată de solvenţi organici. Este practic nehigroscopică şi are proprietăţi dielectrice foarte bune, practic independente de frecvenţă. Se poate trage în folii de 25–30 μm grosime. Se utilizează la izolarea cablurilor de telecomunicaţii în mediu acvatic şi a conductorilor obişnuiţi, sau pentru izolaţii de înaltă frecvenţă (radiolocaţie, televiziune); foliile de polietilenă se folosesc la fabricarea condensatoarelor.

Polipropilena (PP) este un termoplastic neutru, obţinut prin polimerizarea propilenei în prezenţa unui catalizator, având un grad ridicat de cristalinitate, proprietăţi mecanice bune şi temperatură de utilizare mai ridicată ca a polietilenei, de până la 160ºC. Devine casantă la – 10ºC. Este utilizată ca material electroizolant pe un domeniu larg de frecvenţe (cabluri de radiofrecvenţă)

Polistirenul (PS), cunoscut şi sub numele de stiroflex, este un termoplastic nepolar, cu proprietăţi dielectrice foarte bune ($\rho_v > 10^{16}$ Ω·m*)* şi independente de frecvenţă. Se utilizează sub formă de benzi, tuburi, fire, lacuri etc., îndeosebi în înaltă frecvenţă, la fabricarea unor piese electronice (socluri, carcase de bobine etc.) prin turnare sub presiune, extrudare sau prelucrare mecanică. Sub formă de pelicule cu grosimea de 10–20 μm este utilizat ca dielectric pentru condensatoare peliculare şi la izolaţia cablurilor de înaltă frecvenţă. Domeniul temperaturilor de utilizare este între – 50°C şi + 80°C. Piesele confecţionate din polistiren se pot lipi uşor, materialul fiind solubil în benzen.

Politetrafluoretilena (PTFE), cunoscută şi sub numele de **teflon**, se obţine prin polimerizarea tetrafluoretilenei $(CF_2–CF_2)_n$ în emulsie în apă şi are o structură asemănătoare cu cea a polietilenei. Energia de formare a legăturii C–F este mult mai mare decât a legăturii C–H şi conferă polimerului o stabilitate foarte ridicată. Este nepolară, are bune proprietăţi dielectrice şi nu arde. Faza cristalină, de 80–90 %, conferă proprietăţi mecanice bune până la +250 °C. La 327 °C trece în fază amorfă, devenind elastică până la +415°C, când se descompune punând în libertate fluorul, gaz toxic şi foarte activ chimic. La temperaturi joase este utilizabilă până la –90 °C unde îşi pierde elasticitatea datorită prezenţei fazei amorfe. Teflonul are stabilitate chimică excepţională, ce depăşeşte pe cea a aurului
şi platinei. Este nehigroscopic şi nu este atacat de baze sau acizi.

Se utilizează la fabricarea condensatoarelor peliculare şi izolarea firelor în cabluri, pentru realizarea unor izolaţii în medii umede sau în atmosfere puternic corozive, a carcaselor pentru acumulatoare, pentru bobine etc. Este unul dintre cei

mai buni dielectrici la frecvenţe înalte şi ultraînalte. Din PTFE se pot sinteriza piese în cele mai diverse forme din pulberi presate la temperaturi de 360–380 °C.

Policlorura de vinil (PVC) este obţinută prin polimerizarea clorurii de vinil din faza gazoasă, sub forma de PVC tare, fără plastifianţi, sau PVC moale, cu plastifianţi (esteri ai acidului ftalic, fosforic, citric etc.) fiind un material stabil la acţiunea acizilor şi bazelor diluate, a benzinei şi alcoolului, dar cu stabilitate termică redusă. Fiind un material polar, are caracteristici dielectrice mai slabe decât polietilena sau polistirenul, ele variind foarte mult cu frecvenţa şi temperatura. La peste 80 °C proprietăţile mecanice scad, iar sub – 5 °C PVCul devine fragil. Se utilizează de regulă la frecvenţe joase, industriale. În curent continuu îmbătrâneşte foarte repede, datorită electrolizei sărurilor din materialele de adaos, iar la frecvenţe înalte prezintă pierderi dielectrice mari ($tg\delta$ = 0,015–0,3), acestea crescând rapid cu frecvenţa. Se foloseşte pentru izolarea conductorilor de conexiune, sau a celor din cablurile de înaltă tensiune (l–20 kV), ca izolaţie în manta pentru cablurile ce nu sunt supuse la eforturi mecanice, la confecţionarea unor piese izolatoare, tuburi de protecţie pentru instalaţiile electrice, pentru acoperirea unor piese etc.

Polietilentereftalatul, cunoscut şi sub numele de **mila**r, se obţine prin policondensarea etilenglicolului cu acidul tereftalic (poliester). Are un grad de cristalinitate de aproximativ 75 %, ceea ce îi conferă rezistenţă mecanică şi temperatură de topire ridicate (260 °C). Are permitivitatea şi tangenta unghiului de pierderi mari. Domeniul de temperaturi de utilizare este între –60 °C şi +125 °C.

Se utilizează sub formă de pelicule pentru condensatoare miniatură (peliculele sunt foarte subţiri), destinate a lucra condiţii deosebite de umiditate şi temperatură ridicate.

Polimetacrilatul de metil (polimetilmetacrilat – PMMA), cunoscut şi sub numele de **plexiglas**, sau sticlă organică, este cel mai important membru al familiei poliesterilor acrilici, având bune proprietăţi mecanice şi fiind transparent în domeniul vizibil.

Fenoplastele, descoperite în 1907 de către Bakeland sunt cunoscute şi sub numele de **bachelite**. Se obţin prin policondensarea unui mol de fenol C_6H_5–OH cu un mol de formaldehidă CH_2–O, în apă la temperatură ridicată şi în prezenţa unui catalizator bazic (amoniac, hidroxid de sodiu etc.), sau acid (clorhidric, fosforic etc.). Reacţia decurge în trei etape, importante din punct de vedere al aplicaţiilor practice. Bachelita A, sau rezolul, care apare în primul stadiu al reacţiei (cu eliminare de apă), se înmoaie la 60–80 °C, este solubilă în acetonă şi alcooli şi se utilizează ca lac de impregnare. Prin încălzire suplimentară, se obţine bachelita B, sau rezitolul (cu eliminare de apă şi polimerizare), material termoplastic, mai puţin solubil, utilizat ca masă de formare. În stadiul final, bachelita C, sau rezitul are structură tipică termorigidă, în care moleculele formează o reţea spaţială de

legături. Bachelita C are rezistenţă mecanică şi nu este solubilă în solvenţi sau acizi. Bachelitele sunt răşini polare, higroscopice, cu caracteristici dielectrice reduse. Nu sunt stabile la descărcări electrice superficiale, formând trasee (canale) conductoare şi producând gaze inflamabile şi apă. Nu întreţin arderea şi pot fi utilizate la temperaturi ridicate, până la 150–200°C. În industria electrotehnică se utilizează la temperaturi şi frecvenţe industriale, sub formă de lacuri bachelitice şi oleobachelitice pentru impregnarea înfăşurărilor sau stratificatelor şi pentru fabricarea unor piese electroizolante: fişe, prize, carcase pentru diverse aparate.

Tehnologia de fabricare a pieselor este prin presarea pulberii de bachelită în stadiul A la temperaturi de 110–140 °C, cu polimerizare la stadiul C în timpul procesului tehnologic.

Răşinile epoxidice sunt polimeri termorigizi, care au în principiu o structură liniară, cu o grupare epoxi la fiecare capăt al moleculei. Au un aspect de lichid viscos, care se solidifică uşor sub acţiunea unor solidificatori, fără eliberarea unor produse suplimentare. Alegerea solidificatorului influenţează proprietăţile mecanice şi electrice. Sunt materiale d electrice polare, cu bune proprietăţi electrice şi tehnologice. Datorită formării radicalilor –OH în timpul polimerizării răşinile epoxidice au o bună aderenţă pe corpurile metalice şi nemetalice: sticlă, porţelan etc. Se utilizează în special ca răşini de turnare, de impregnare, de lipire, sau emailare, sub formă de compounduri pentru impregnarea şi umplerea diverselor piese si componente electronice şi electrotehnice: condensatoare, transformatoare, mufe pentru cabluri, dispozitive semiconductoare. Sunt neinflamabile, stabile termic şi chimic.

Celuloza este un polimer natural cu n = 1000–3500, la care moleculele liniare formează micele (mănunchiuri) cu grosimi de ordinul 20 ÷ 60 Å, care, la rândul lor, formează tuburi subţiri (fibrili) cu diametrul de până la 0,5 μm, care se unesc, formând fibre cu diametre de ~ 50 μm şi lungimi de 10^{-3}–10^{-2} m. Între fibrili şi, mai ales între fibre, există pori care reprezintă aproximativ 50 % din volumul substanţei. Ţinând cont şi de prezenţa grupărilor hidroxil în moleculă, aşa se explică higroscopicitatea mare a materialelor celulozice, care înrăutăţeşte proprietăţile dielectrice ale lor (reduce şi rigiditatea dielectrică).

Se degradează termic la circa 250 °C prin ruperea lanţurilor moleculare (micşorarea gradului de polimerizare). În prezenţa umidităţii, la aproximativ 150 °C se produce hidroliza şi ruperea lanţurilor moleculare. Oxigenul din aer la 60–70 °C oxidează celuloza formând radicali aldehidici sau carboxilici, iar la temperaturi mai ridicate produce distrugerea completă, cu formarea de CO_2 sau CO.

Materiale electrotehnice pe bază de celuloză sunt hârtia, cartonul (preşpanul), firele sau ţesăturile, care sunt materiale relativ ieftine şi uşor prelucrabile, dar cu proprietăţi variabile în timp şi higroscopice. Hârtia de cablu are densitate mică (putând fi impregnată), rezistenţă la tracţiune şi sfâşiere mare, factor

de pierderi redus şi rigiditate dielectrică mare. Se utilizează la izolarea cablurilor de transport electric, a straturilor de conductoare de bobinaj etc. Hârtia de condensator, impregnată este omogenă, densă, subţire, cu bune proprietăţi dielectrice, fiind utilizată la fabricarea condensatoarelor. Cartonul electrotehnic, sau preșpanul este obţinut prin presarea în stare umedă a straturilor de hârtie foarte fină. Este rezistent la acţiunea uleiului, cu bună rezistenţă mecanică, fiind utilizat la izolarea straturilor de bobinaj la transformatoare, sau ca izolaţie de crestătură în construcţia motoarelor electrice. Firele şi ţesăturile din bumbac sau mătase (naturală sau artificială) se folosesc pentru izolarea conductoarelor, a bobinelor pentru maşini, a aparatelor electrice etc.

Cauciucurile sunt materiale cu elasticitate mare care, sub acţiunea unor forţe mecanice exterioare se deformează, dar îşi recapătă dimensiunile iniţiale odată cu anularea acestor solicitări. In stare tensionată ele prezintă tendinţă de cristalizare.

Cauciucul natural (produs de arborele de cauciuc), polimer natural al izoprenului, cu grad de polimerizare n cuprins între 2000 şi 4000, este un lichid viscos în stare naturală, care, vulcanizat cu sulf la numai câteva procente (4 % în greutate), formează cauciucul elastic, prin stabilirea unor punţi care leagă lanţurile de polimeri, permiţându-le însă să-şi schimbe configuraţiile întâmplătoare (să se întindă). Creşterea procentului de sulf (la 45%) conduce la formarea unei reţele spaţiale rigide, **ebonita**. Materialul este atacat de oxigen şi ozon. Are proprietăţi dielectrice foarte bune, dar caracteristici termice şi mecanice reduse. Introducerea sulfului, a negrului de fum şi a antioxidanţilor (fenoli, amine, fosfaţi aromatici etc.) îmbunătăţeşte proprietăţile mecanice şi termice (devine elastic şi scade tendinţa de cristalizare), dar, în acelaşi timp, scade proprietăţile dielectrice (scade ε, creşte tgδ, scad rigiditatea şi rezistivitatea volumică). Cauciucul se utilizează la izolarea conductorilor electrici flexibili şi a cablurilor pentru instalaţii interioare, la tensiuni mici şi în medii care nu conţin ulei mineral sau solvenţi halogenaţi.

Cauciucurile sintetice au în general proprietăţi dielectrice mai slabe dar proprietăţi mecanice şi termice superioare şi, în plus, sunt rezistente la solvenţi, uleiuri etc.

10.3.2. Materiale dielectrice solide anorganice

Mica este un produs natural cu structură cristalină, pe bază de Al_2O_3 şi SiO_2, care mai conţine ca impurităţi grupări hidroxil, compuşi ai Fe, Ca, Ti. Se utilizează sub formă de plăci despicate manual (din minereul purificat), cu grosimi până la 5 μm, ştanţate la forma şi dimensiunile cerute, în condensatoare sau ca izolant în montaje electronice, aparate de măsură etc.

Produsele pe bază de mică se utilizează în sistemul de izolaţii al aparatelor şi maşinilor electrice cu regimuri dure de exploatare (puteri mari şi tensiuni ridicate),

deoarece au durată de viaţă mare şi sunt rezistente la acţiunea descărcărilor parţiale, la izolarea lamelelor de colector şi a bobinelor electromagneţilor.

Ca o concluzie a celor discutate, iată în continuare o enumerare a principalelor utilizări în electrotehnică şi electronică a materialelor dielectrice, cu precizarea mărimilor fizice importante pentru aplicaţiile respective:

 dielectrici pentru condensatoare; mărimile fizice importante sunt permitivitatea electrică, dependenţa ei de temperatură şi frecvenţă, precum rigiditatea dielectrică şi, în anumite cazuri, rezistenţa mecanică, conductivitatea termică, higroscopicitatea, etc.

 materiale pentru piese electroizolante utilizate în electrotehnică şi electronică: cabluri, casete, socluri, comutatoare, clape; sunt importante rezistenţa volumică şi superficială, rigiditatea dielectrică, higroscopicitatea.

 materiale pentru suporturi dielectrice în tehnologia circuitelor imprimate şi în microelectronica peliculară; sunt importante proprietăţile dielectrice şi mecanice precum şi cele de higroscopicitate şi conductivitate termică ridicată.

 materiale electroizolante lichide sau solide de umplere şi impregnare, sau de protecţie a componentelor electronice: lacuri de acoperire şi compounduri, răşini epoxidice, etc.

 materiale dielectrice pentru dispozitive numerice, elemente de memorie: cristale feroelectrice $BaTiO_3$ sau compuşi cu ciclu de histerezis electric rectangular.

 materiale pentru traductori piezoelectrici pe bază de ceramici din seria titanozirconatelor de Ba şi Pb (cu formula generică $PbZrTiO_3$), sau monocristale de sare Rochelle etc., folosite pentru producerea ultrasunetelor, sau pentru efectul invers, de transformare a energiei mecanice în energie electrică (doze, microfoane cu cristal piezoelectric, generatoare de tensiune înaltă pentru aprindere prin scânteie etc.).

 materiale pentru transformatoare şi filtre piezoelectrice cu undă elastică de volum sau de suprafaţă, linii de întârziere, codificatoare şi decodificatoare pentru semnale modulate în fază, sau amplificatoare dielectrice.

 materiale pentru modulatoare laser pe baza efectului electrooptic sau obturatoare electrooptice de tip „Q-switch”.

 materiale pentru optica neliniară: generarea de armonici, mixarea, înregistrarea hologramelor în volum.

 ceramici electrooptice cu formula generică $Pb(ZrTi)O_3$ şi structură perovskit, cu tehnologie de fabricaţie mai simplă decât monocristalele având şi efect de memorie electrooptică.

 materiale pentru traductori piroelectrici în infraroşu, pentru formarea imaginilor termice sau măsurarea temperaturii la distanţă.

 materiale pentru modulaţie şi realizarea ecranelor TV cu dimensiuni de ordinul 3-5 m.

 materiale feroelectrice a căror permitivitate reală poate fi modificată controlat cu câmpuri electrice continue sau alternative, utilizate pentru realizarea unor circuite neliniare şi parametrice (modulatoare dielectrice în amplitudine sau fază, amplificatoare dielectrice sau stabilizatoare de curent sau tensiune, etc.).